

Satelliittipaikannuksen hyödyntäminen tieliikenteessä ja paikannukseen kohdistuvien häiriöiden vaikutukset



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Riihimäki, Liikenneala

Kevät, 2020

Osku Kärki

Liikenneala
Riihimäki

Tekijä	Osku Kärki	Vuosi 2020
Työn nimi	Satelliittipaikannuksen hyödyntäminen tieliikenteessä ja paikannukseen kohdistuvien häiriöiden vaikutukset	
Työn ohjaajat	Teppo Sotavalta (HAMK), Tuukka Mattila (Traficom)	

TIIVISTELMÄ

Tämä opinnäytetyö tehtiin osana liikennealan insinöörin opintoja. Tutkimuksen aikana opitut asiat tukevat tekijän ammattitaitoa nykyisessä asiantuntijatyössä Liikenne- ja viestintävirasto Traficomissa. Työtä voidaan hyödyntää myös perehdytysmateriaalina satelliittipaikannuksen ja häiriöiden perusteisiin Traficomien asiantuntijoille sekä muille aiheesta kiinnostuneille. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää tärkeimpiä satelliittipaikannusta hyödyntäviä tieliikenteen sovelluksia ja niiden toimintaa sekä niihin kohdistuvia vaikutuksia paikannuksen häiriötilanteissa. Lisäksi opinnäytetyössä tarkastellaan yleisesti satelliittipaikannuksen ja siihen kohdistuvien häiriöiden perusteita. Sovellukset ja vaikutukset rajattiin kattamaan vain tieliikenne.

Työn lähteinä käytettiin pääosin internet-aineistoja ja tiedonkeruuseen hyödynnettiin myös asiantuntijakyselyä haastattelun muodossa, johon vastasi viisi satelliittipaikannuksen tai autonomisten ajoneuvojen asiantuntijaa. Vastaajia oli Metropolia ammattikorkeakoulusta, Maanmittauslaitoksesta sekä Teknologian tutkimuskeskus VTT:stä.

Työssä esitellään maailmalla käytössä olevat GNSS-järjestelmät ja satelliittipaikannuksen toiminnan perusteet. Häiriöitä käsittelevässä kappaleessa kerrotaan sen eri tyypeistä ja avataan häiriöiden vaikutusten perusteita. Häiriöiden osalta käsitellään vain radiotaajuista häirintää ja häiriöitä. Työssä ei oteta huomioon kyberturvallisuusnäkökulmaa. Satelliittipaikannusta hyödyntävistä tieliikenteen sovelluksista käsitellään kahdeksaa merkittävintä ja kuvataan niiden toimintaa. Häiriöiden aiheuttamia vaikutuksia tieliikenteen sovelluksille esitellään viimeisessä kappaleessa ennen yhteenvetoa.

Avainsanat Global Navigation Satellite Systems (GNSS), radiotaajuinen häirintä, satelliittipaikannus, tieliikenne

Sivut 52 sivua, joista liitteitä 1 sivu

Traffic and Transport Management
Riihimäki

Author	Osku Kärki	Year 2020
Subject	Utilization of satellite positioning in road traffic and effects of interference on positioning	
Supervisors	Teppo Sotavalta (HAMK), Tuukka Mattila (Traficom)	

ABSTRACT

This thesis was done as part of the studies of Bachelor's degree studies in Traffic and Transport Management. The topics studied during the project support the author's professional skills in his expert work at the Finnish Transport and Communications Agency Traficom. The work can also be used as an introduction to satellite positioning and interference for other experts at Traficom and others interested in the subject. The aim of this project was to find out the most important road traffic applications utilizing satellite positioning and their operations as well as their impact on the case of positioning disturbances. In addition, the project dealt with the basics of satellite positioning and interference in general. Applications and effects were limited to road traffic only.

The sources of the work were mainly internet-based and expert inquiry was also used to collect the data. Respondents in the survey were from Metropolia University of Applied Sciences, the National Land Survey of Finland and VTT Technical Research Center of Finland.

This work introduces the GNSS systems which are used worldwide as well as the basics of satellite navigation. The interference chapter describes the various types of interference and opens the basis for its effects. In case of interference, only radio frequency interference is discussed here. The work does not take into account the cyber security aspect. Eight of the most significant road traffic applications utilizing satellite positioning are discussed and their functions are described. The effects of interference on road traffic applications are presented in the last paragraph before the summary.

Keywords Global Navigation Satellite Systems (GNSS), radio frequency interference, road traffic, satellite positioning

Pages 52 pages including appendices 1 page

SISÄLLYSLUETTELO

Lyhenteet

1	JOHDANTO.....	1
2	SATELLIITTIPAIKANNUSJÄRJESTELMÄT	2
2.1	GNSS.....	2
2.1.1	GPS.....	4
2.1.2	GLONASS.....	6
2.1.3	Galileo.....	7
2.1.4	BeiDou	8
2.2	NavIC	9
2.3	QZSS.....	10
2.4	SBAS.....	11
3	SATELLIITTIPAIKANNUKSEN PERUSTEET.....	14
3.1	Vastaanottimet.....	14
3.2	GNSS-signaalien rakenne	14
3.3	Koodiin perustuva paikannus.....	16
3.4	Kantoaaltoon perustuva paikannus	17
4	SATELLIITTIPAIKANNUKSEN HYÖDYNTÄMINEN TIELIIKENTEESSÄ.....	19
4.1	Satelliittipaikannuksen markkinat.....	19
4.2	Navigointi ja reittisuunnittelu	20
4.3	eCall	21
4.4	MaaS.....	23
4.5	Älypiirturi.....	24
4.6	Tiemaksut	24
4.7	Kalustonhallintajärjestelmät	25
4.8	Ajoneuvojen vakuutusmaksut.....	26
4.9	Autonomiset ajoneuvot	26
5	SATELLIITTIPAIKANNUKSEN HÄIRIÖT JA VIRHELÄHTEET	29
5.1	Tahattomat häiriöt ja virhelähteet.....	29
5.2	Tahalliset häirintämenetelmät.....	30
5.2.1	Jamming.....	30
5.2.2	Spoofing.....	32
5.3	Häiriöiden vastatoimet.....	33
6	SATELLIITTIPAIKANNUKSEN HÄIRIÖIDEN VAIKUTUKSET	37
6.1	Vaikutukset autonomisiin ajoneuvoihin	37
6.2	Vaikutukset muihin tieliikenteen sovelluksiin.....	39
7	YHTEENVETO JA POHDINTA.....	42
	LÄHTEET	44

Liite 1 Asiantuntijakysely - kysymykset. 1 sivu.

Lyhenteet

ADAS	Advanced Driver-Assistance Systems Auton kuljettajaa avustavia järjestelmiä kuten kaistanpitoavustin
AJ	Anti-Jam Häirinnän estämiseen suunniteltujen tekniikoiden nimitys
AS	Authorized Service Kiinalaisen satelliittipaikannusjärjestelmän viranomaiskäyttöön suunniteltu signaali
BOC	Binary Offset Carrier Satelliittipaikannusjärjestelmien signaalien modulointitapa
BPSK	Binary Phase Shift Keying Satelliittipaikannusjärjestelmien signaalien modulointitapa
CDMA	Code Division Multiple Access Signaalien erottelu koodijakokanavoinnilla
CLAS	Centimeter Level Augmentation Service Japanilaisen satelliittipaikannusjärjestelmän senttimetritarkka korjaussignaali- palvelu
CRPA	Controlled Reception Pattern Antenna Useammasta antennielementistä koostuva antenni
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service Pääosin lentoliikenteen tarpeisiin hyödynnettävä eurooppalainen satelliittipohjainen korjaussignaali- palvelu
FDMA	Frequency Division Multiple Access Signaalien erottelu taajuuskanavoinnilla
GAGAN	GPS Aided GEO Augmented Navigation Pääosin lentoliikenteen tarpeisiin hyödynnettävä intialainen satelliittipohjainen korjaussignaali- palvelu
GEO	Geostationary Orbit Satelliittien geostationäärinen kiertorata
GLONASS	Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya Sistema Venäläinen satelliittipaikannusjärjestelmä
GNSS	Global Navigation Satellite System Globaaleista eri maiden satelliittipaikannusjärjestelmistä käytetty nimitys

GPS	Global Positioning System Yhdysvaltalainen satelliittipaikannusjärjestelmä
GSA	European Global Navigation Satellite Systems Agency Euroopan GNSS-virasto
HAS	High Accuracy Service Galileon ilmainen paikannuspalvelu
IMU	Inertial Measurement Unit Inertiamittaussyksikkö
INS	Inertial Navigation System Kiihtyvyyksien mittaamiseen perustuva inertiasuunnistusjärjestelmä
IRNSS	Indian Regional Navigational Satellite System Intialainen satelliittipaikannusjärjestelmä (vanhempi nimitys)
MaaS	Mobility as a Service Liikkumisen palveluistumisen konsepti
MEO	Medium Earth Orbit Satelliittien keskikorkea kiertorata
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System Pääosin lentoliikenteen tarpeisiin hyödynnettävä japanilainen satelliittipohjainen korjaussignaali- ja palvelu
MSD	Minimum Set of Data Informaatiota sisältävä viesti
NavIC	Navigation with Indian Constellation Intialainen satelliittipaikannusjärjestelmä
OS	Open Service Ilmainen siviilikäyttöön tarkoitettu paikannuspalvelu
PLMN	Public Land Mobile Network Matkaviestinverkko
PNT	Positioning Navigation and Timing Satelliittipaikannusjärjestelmien sijainti-, navigointi- ja aikapalvelu
PPD	Personal Privacy Device Ajoneuvoissa käytettävä pienitehoinen häirintälähetin
PPP	Precise Point Positioning Senttimetrin tarkkuutta yhden vastaanottimen paikannusmenetelmä

PPS	Precise Positioning Service Viranomaiskäyttöön tarkoitettu paikannuspalvelu
PRN code	Pseudo Random Noise code Satelliittien tunnistamisessa hyödynnettävä pseudosatunnainen koodi
PRS	Public Regulated Service Viranomaiskäyttöön tarkoitettu paikannuspalvelu
PS	Precision Service Viranomaiskäyttöön tarkoitettu paikannuspalvelu
PSAP	Public Safety Answering Point Hätäkeskuksen puhelinpäivystys
PSTN	Public Switched Telephone Network Perinteinen puhelinverkko
QZSS	Quasi-Zenith Satellite System Japanilainen satelliittipaikannusjärjestelmä
RTK	Real-Time Kinematic Senttimetr tarkka reaaliaikainen paikannusmenetelmä
SAR	Search and Rescue Eurooppalaisen satelliittipaikannusjärjestelmän pelastuspalvelu
SBAS	Satellite Based Augmentation System GNSS-järjestelmien satelliittipohjainen paikannuksen parannuspalvelu
SDCM	System for Differential Corrections and Monitoring Pääosin lentoliikenteen tarpeisiin hyödynnettävä venäläinen satelliittipohjainen korjaussignaali palvelu
SLAS	Sub-meter Level Augmentation Service Japanilaisen satelliittipaikannusjärjestelmän alle metritarkka korjaussignaali palvelu
SNAS	Satellite Navigation Augmentation System Pääosin lentoliikenteen tarpeisiin hyödynnettävä kiinalainen satelliittipohjainen korjaussignaali palvelu
SoL	Safety of Life service Turvallisuuskriittisissä sovelluksissa käytettävä paikannuspalvelu
SPS	Standard Positioning Service Ilmainen siviilikäyttöön tarkoitettu paikannuspalvelu

V2X	Vehicle-to-Everything Älyliikenteen datanvälitys-sovellus
WAAS	Wide Area Augmentation System Pääosin lentoliikenteen tarpeisiin hyödynnettävä yhdysvaltalainen satelliittipohjainen korjaussignaali palvelu
WGS84	World Geodetic System 1984 Tasokoordinaattijärjestelmä, jota ylläpitää Yhdysvaltojen puolustusministeriö

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää tärkeimpiä satelliittipaikannusta hyödyntäviä tieliikenteen sovelluksia ja niiden toimintaa sekä niihin kohdistuvia vaikutuksia paikannuksen häiriötilanteissa. Lisäksi opinnäytetyössä tarkastellaan yleisesti satelliittipaikannuksen ja siihen kohdistuvien häiriöiden perusteita. Työ on rajattu kattamaan vain tieliikenne, sillä satelliittipaikannusta hyödynnetään myös muissa liikennemuodoissa ja lukuisissa yhteiskunnan palveluissa. Työssä tarkastellaan vain radiotaajuushäiriöitä eikä oteta mukaan kyberturvallisuuskulmaa, joka on myös merkittävä uhka älyliikenteelle. Tällä sisällön laajuus on saatu pysymään kohtuullisena. Opinnäytetyö on tutkimuspainotteinen ja sen lähteenä on käytetty pääosin internet-aineistoja. Lisäksi tietolähteenä on asiantuntijakysely, johon vastasi kaksi Maanmittauslaitoksen tutkijaa, kaksi Teknologian tutkimuskeskus VTT:n asiantuntijaa sekä yksi älyliikenteen asiantuntija Metropoliasta. Työssä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Mitä ovat satelliittipaikannuksen häiriöt?
- Mihin tieliikenteen sovelluksiin hyödynnetään satelliittipaikannusta?
- Mitkä ovat satelliittipaikannukseen kohdistuvien häiriöiden vaikutukset tieliikenteelle ja sen sovelluksille?

Oppimistavoitteena työlle on satelliittipaikannuksen perusteiden tunteminen ja siihen kohdistuvien häiriötyyppien oppiminen. Tavoitteeseen pääsy tukee erinomaisesti nykyisessä työssäni vaadittavaa ammattitaitoa. Työntantajani on Liikenne- ja viestintävirasto Traficom.

Globaaleja satelliittipaikannusjärjestelmiä kutsutaan yhteisellä termillä GNSS (Global Navigation Satellite System). Satelliittipaikannuksen hyödyntäminen ja markkinat ovat valtavassa kasvussa maailmanlaajuisesti. Sitä hyödynnetään nykypäivänä ja tulevaisuudessa kasvavissa määrin erityisesti turvallisuuskriittisiin toimintoihin kuten autonomisten ajoneuvojen paikannusratkaisuihin. Tästä syystä satelliittipaikannuksen häiriöiden tunnistaminen ja huomioon ottaminen on tärkeässä osassa tulevaisuuden kehitystä ja liikenneturvallisuutta.

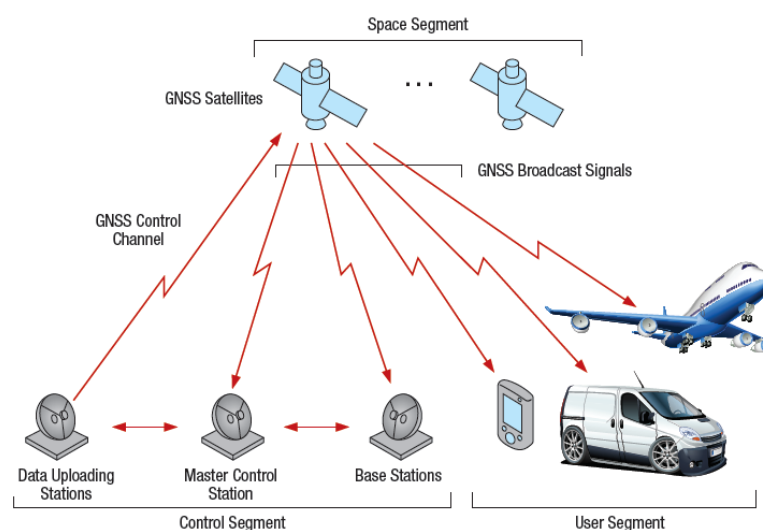
Satelliittipaikannusta hyödyntävien turvallisuuskriittisten toimintojen lisääntyessä kehittyä sen rinnalla myös tahallisen häirinnän mahdollistavat laitteet. Nykypäivänä näiden laitteiden hankkiminen onnistuu kenen tahansa toimesta ulkomaisista verkkokaupoista helposti ja alhaisilla kustannuksilla. GNSS-paikannus on erittäin häiriöherkkä palvelu, koska paikannussignaali on maahan saapuessaan heikkotehoinen ja on alttiina useille häiriötyypeille sekä virhelähteille. Onneksi nykyteknologia mahdollistaa näiden minimoimisen ja vaikutusten poistamisen jopa kokonaan. Opinnäytetyön luvussa neljä käsitellään tärkeimpiä vastatoimia tahattomia ja tahallisia häiriöitä vastaan.

2 SATELLIITTIPAIKANNUSJÄRJESTELMÄT

Satelliittipaikannus perustuu satelliitin lähettämään signaaliin, joka sisältää paikannukseen tarvittavaa informaatiota. Paikannukseen käytettävä vastaanotin tekee saadun datan perusteella laskennan, jolla se tuottaa sijaintitiedon. Satelliittipaikannukseen käytetään useita eri satelliittijärjestelmiä, jotka koostuvat useista yksittäisistä satelliiteista. Tässä kappaleessa kuvataan maailmalla käytössä olevat satelliittipaikannusjärjestelmät. Ensimmäin kuvataan yleisellä tasolla maailmanlaajuiset satelliittipaikannusjärjestelmät, joista käytetään nimitystä GNSS (Global Navigation Satellite System) ja tämän jälkeen kuvataan tarkemmin yksittäiset satelliittipaikannusjärjestelmät. Kolmessa viimeisessä alakappaleessa kuvataan kaksi alueellista satelliittipaikannusjärjestelmää ja yksi järjestelmä, joka tuottaa korjaustietoa globaaleihin satelliittipaikannusjärjestelmiin.

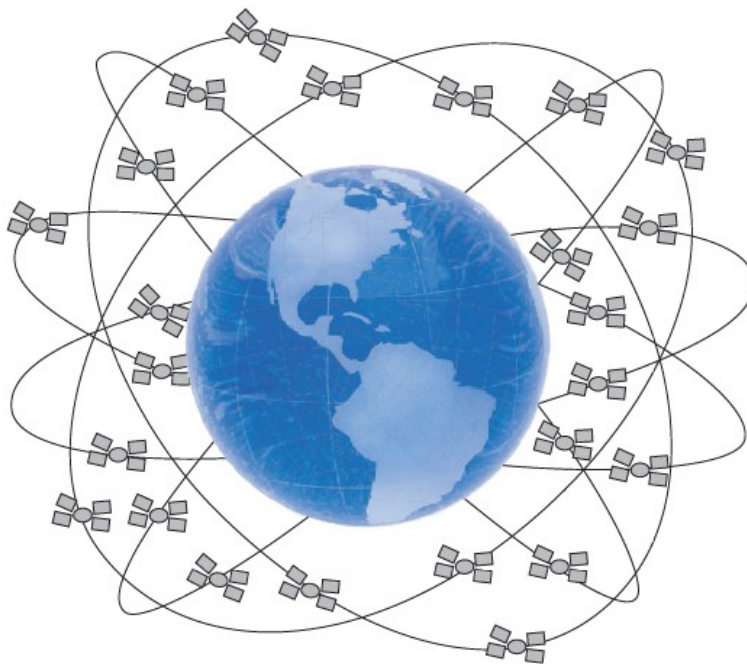
2.1 GNSS

Globaalissa käytössä on neljän eri valtion GNSS-järjestelmät. Niitä ovat yhdysvaltalainen GPS (Global Positioning System), venäläinen GLONASS (Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema), eurooppalainen Galileo ja kiinalainen BeiDou. Näistä GPS, GLONASS ja BeiDou ovat täysin operatiivisia, kun taas Galileon arvioidaan olevan täydessä operatiivisessa vaiheessa vuonna 2020. Galileo tarjoaa muiden järjestelmien ohella kuitenkin jo nyt käyttäjilleen toimivaa palvelua. GNSS-järjestelmien tarjoamat palvelut ovat käytössä ympäri maailmaa ja paikannus onnistuu lähes joka paikassa muutaman metrin tarkkuudella. (GSA, 2017; ks. myös GIM, 2019) Satelliittipaikannusjärjestelmät koostuvat kolmesta eri segmentistä, joita ovat avaruus-, hallinta- ja käyttäjäsegmentti. (NovAtel 1, 2015, s. 7) Segmentit on havainnollistettu kuvassa 1.



KUVA 1. GNSS-järjestelmän segmentit. (NovAtel 1, 2015, s. 7)

Avaruussegmentti koostuu kaikista GNSS-järjestelmien satelliiteista, joita on tällä hetkellä operatiivisessa käytössä yhteensä noin 130 kappaletta. Satelliitit lähettävät aika- ja paikkatietoa käyttäjäsegmentille sekä ovat myös yhteydessä toisiin satelliitteihin ja hallintasegmenttiin, joka vastaanottaa tietoa esimerkiksi satelliittien kunnosta ja signaalin laadusta. Valtaosa satelliiteista kiertää maapalloa MEO (Medium Earth Orbit) -kiertoradalla pääosin noin 20 000 kilometrin korkeudella omilla radoillaan. Osa BeiDou-järjestelmän satelliiteista kiertävää maapalloa GEO (Geostationary Orbit) -kiertoradalla noin 35 000 kilometrin korkeudella. (NovAtel 1, 2015, s. 8; ks. myös IAC 1, n.d.) Kuvassa 2 esitetään satelliittien kiertoratoja kuvituskuvana.



KUVA 2. Kuvituskuva GNSS-satelliittien kiertoradoista. (NovAtel 1, 2015, s. 7)

Hallintasegmentti muodostuu kolmesta maanpäällisestä eri asematyyppistä. Näitä ovat pääkontrolliasema, datanlähetyasemat ja monitorointiasemat. (NovAtel 1, 2015, s. 9) Kaikkien GNSS-järjestelmien hallintasegmentti perustuu samaan periaatteeseen, mutta eri järjestelmien välillä on vaihtelua asemien lukumäärissä ja sijainneissa. Osalla järjestelmistä on vain kansallisia hallintasegmentin osia, kun taas esimerkiksi GPS-järjestelmän hallintasegmentti on levittäytynyt ympäri maailmaa. Kuvassa 3 on esitetty GPS-järjestelmän hallintasegmentin sijainnit. Monitorointiasemat tallentavat satelliittien lähettämää dataa, joka sisältää esimerkiksi etäisyys-, ilmakehä-, satelliitin kiertorata- ja kellovirhetietoja. Nämä tiedot välitetään maanpäällisen verkon välityksellä pääkontrolliasemalle. Siellä suoritettujen laskentojen perusteella muodostetut korjaustiedot välitetään takaisin avaruussegmentin satelliiteille yhteistyössä datanlähetyasemien kanssa. Lisäksi pääkontrolliasemalta voidaan hallita ja monitoroida

useita satelliittien toimintoja. Näillä toimenpiteillä varmistetaan käyttäjäsegmentille välittyvän aika- ja paikkatiedon oikeellisuus. (PennState, n.d.)



Kuva 3. GPS-järjestelmän hallintasegmentti. (PennState, n.d.)

Käyttäjäsegmentti muodostuu satelliittisignaaleja prosessoivista vastaanottimista, jotka tuottavat paikka- tai aikatietoa. Käyttäjäsegmentin laitteita ovat esimerkiksi älypuhelimet, maanmittauslaitteet, autojen navigaattorit tai lentokoneiden navigointijärjestelmät. (NovAtel 1, 2015, s. 9) Käyttäjän saamaan paikannustarkkuuteen vaikuttaa käytettävä vastaanotin. Esimerkiksi laadukas maanmittauksessa hyödynnettävä vastaanotin tuottaa huomattavasti paremman sijaintitarkkuuden kuin älypuhelin tai auton navigaattori. (Ucar, 2014)


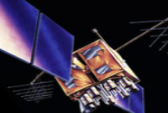
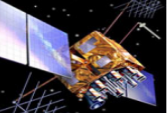
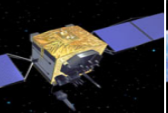
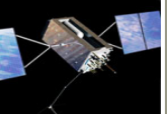
2.1.1 GPS

GPS-satelliittipaikannusjärjestelmä on Yhdysvaltojen asevoimien valmista ja omistama järjestelmä, joka tarjoaa käyttäjilleen PNT (Positioning, Navigation and Timing)-palveluita maailmanlaajuisesti. PNT-palvelu tarkoittaa paikka- ja aikaratkaisun sekä navigoinnin tuottamista satelliittien avulla. GPS suunniteltiin ja valmistettiin Yhdysvaltojen asevoimien käyttötarkoituksiin, mutta myöhemmin järjestelmä vapautui myös siviilikäyttöön ilmaiseksi palveluksi. Järjestelmää ylläpitää, kehittää ja operoi Yhdysvaltojen ilmavoimat. Virallinen täydellinen nimi järjestelmälle on NAVSTAR Global Positioning System, mutta siitä käytetään yleisesti nimitystä GPS. (GPS.gov, n.d.)

Nykyinen GPS-järjestelmä sai suuntaviivat kehitykselleen jo 1960-luvulla, jolloin valmistettiin maailman ensimmäiset satelliittipaikannusjärjestelmät. Nämä olivat vuosina 1963 ja 1967 laukaistut TRANSIT- ja TIMATION-järjestelmien satelliitit. (Alexandrow, 2016, s. 54; ks. myös NRL, n.d.) Ensimmäinen varsinainen GPS-järjestelmän satelliitti laukaistiin avaruuteen helmikuussa 1978. Vuoteen 1993 mennessä satelliitteja oli maan kiertoradalla operatiivisessa käytössä 24 ja vuonna 1995 järjestelmä saavutti täyden operatiivisen valmiuden. Nykypäivänä operatiivisessa käytössä on 31 satelliittia. (ESA, 2011)

GPS-järjestelmä hyödyntää kolmea eri taajuutta, jotka ovat 1575.42 MHz (L1), 1227.6 MHz (L2) ja 1176.45 MHz (L5). Kaikilla taajuuksilla lähetetään eri tavoin koodattuja useita signaaleja eri käyttötarkoituksiin. Ensimmäiset GPS -satelliitit lähettivät kantoaaltoa vain kahdella taajuudella (L1 ja L2), joista ainoastaan L1 oli siviilikäytössä. Yhdysvaltain asevoimien käytössä oli molemmat taajuudet. Siviilikäyttöön suunnatusta paikannuspalvelusta käytetään nimitystä SPS (Standard Positioning Service) ja viranomaiskäyttöön tarkoitettua rajatusta palvelusta PPS (Precise Positioning Service). (GPS.gov, n.d.)

Nykyään siviilikäytössä hyödynnetään kolmea eri signaalia, jotka ovat L1, L2 taajuudella lähetettävä L2C-signaali ja vuonna 2010 laukaistujen satelliittien lähettämä L5-signaali. L2C ja L5 ovat esi-operatiivisessa käytössä, eikä ne ole vielä täysin toimintavarmoja. Lisäksi siviilikäyttöön on tulossa neljäs signaali, joka toimii myös alkuperäisellä L1 taajuudella ja sitä kutsutaan nimellä L1C. Uusi signaali tulee käyttöön vuoden 2020 lopussa. (GPS.gov, n.d.) SPS-palvelun signaalit hyödyntävät C/A (Course/Acquisition) -koodia ja PPS-palvelun signaalit P(Y) (Precision/secure) -koodia. Viranomaiskäytössä on myös M-koodi, joka tarjoaa P(Y)-koodia vahvemman salauksen ja paremman häiriönsietokyvyn. (ESA, 2011) Kuvassa 4 esitetään GPS-järjestelmän satelliittien kehitysvaiheet ja niiden lähettämät signaalit.

LEGACY SATELLITES			MODERNIZED SATELLITES	
				
BLOCK IIA	BLOCK IIR	BLOCK IIR-M	BLOCK IIF	GPS III/IIF
1 operational	11 operational	7 operational	12 operational	1 in checkout
<ul style="list-style-type: none"> Coarse Acquisition (C/A) code on L1 frequency for civil users Precise P(Y) code on L1 & L2 frequencies for military users 7.5-year design lifespan Launched in 1990-1997 	<ul style="list-style-type: none"> C/A code on L1 P(Y) code on L1 & L2 On-board clock monitoring 7.5-year design lifespan Launched in 1997-2004 	<ul style="list-style-type: none"> All legacy signals 2nd civil signal on L2 (L2C) New military M code signals for enhanced jam resistance Flexible power levels for military signals 7.5-year design lifespan Launched in 2005-2009 	<ul style="list-style-type: none"> All Block IIR-M signals 3rd civil signal on L5 frequency (L5) Advanced atomic clocks Improved accuracy, signal strength, and quality 12-year design lifespan Launched in 2010-2016 	<ul style="list-style-type: none"> All Block IIF signals 4th civil signal on L1 (L1C) Enhanced signal reliability, accuracy, and integrity No Selective Availability 15-year design lifespan IIF: laser reflectors; search & rescue payload First launch in 2018

Kuva 4. GPS-satelliittien ja niiden lähettämien signaalien kehitys. (GPS.gov, n.d.)

Sotilas- ja viranomaiskäyttöön lähetetään neljää rajatun palvelun signaalia taajuuksilla L1 ja L2. Molemmilla taajuuksilla hyödynnetään P(Y)-koodilla ja M-koodilla moduloituja signaaleita. Näitä paikannussignaaleja pystyy käyttämään ainoastaan rajattu käyttäjäryhmä tätä tarkoitusta varten valmistetuilla vastaanottimilla ja salausavaimilla. (ESA, 2011)

2.1.2 GLONASS

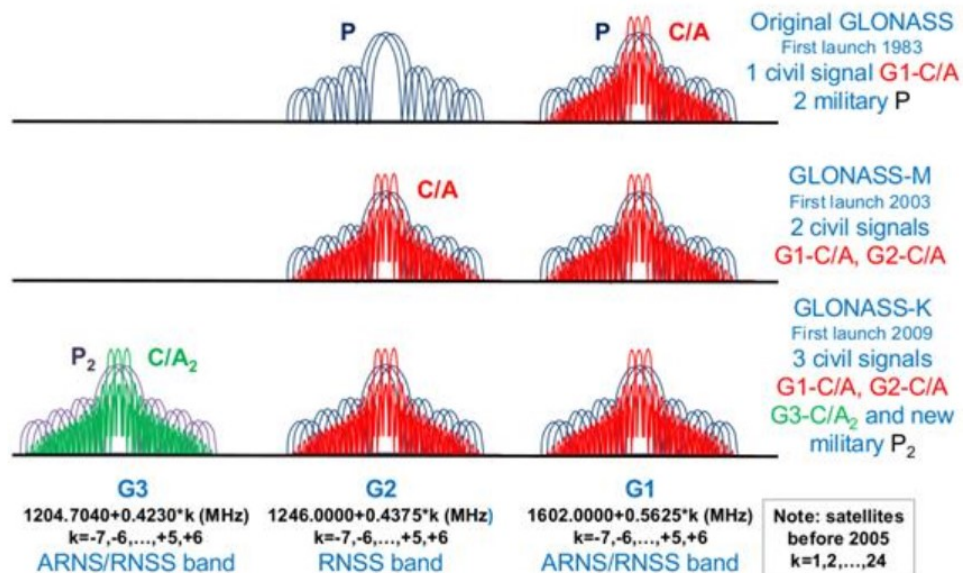
GLONASS on venäläisten valmistama ja venäjän asevoimien hallinnoima satelliittipaikannusjärjestelmä. Se pohjautuu 1950-luvun lopulla keksittyyn ajatukseen siitä, että satelliitteja voisi hyödyntää paikan määrittämiseen. Vuonna 1967 laukaistiinkin ensimmäinen venäläinen paikantamiseen suunniteltu satelliitti Cosmos-192. Alkuvaiheen järjestelmää kutsuttiin nimellä Cicada, mutta järjestelmä oli toiminnassa vain hieman yli 10 vuotta. (IAC 2, n.d.)

Vuonna 1982 aloitettiin varsinaisen GLONASS-järjestelmän satelliittien testilennot ja 1995 järjestelmä saavutti täyden operatiivisen vaiheen 24 satelliitillaan. 2000-luvun alussa järjestelmän toimivien satelliittien määrä tipui seitsemään, koska 90-luvun rahoitus oli riittämätön. Tuolloin satelliittien määrä oli liian vähäinen kunnollisen paikannuspalvelun tuottamiseen. Tilanne kuitenkin korjaantui vuodesta 2002 lähtien, jolloin alkoi GLONASS-järjestelmän uusi kehitysvaihe vuoteen 2011 asti. (IAC 2, n.d.)

Nykypäivänä GLONASS-järjestelmään luetaan 22 operatiivisessa käytössä olevaa satelliittia. Järjestelmässä on tälläkin hetkellä käynnissä kehitysohjelma, joka päättyy vuonna 2020. GLONASS on tarjonnut pitkälti tähän päivään asti ainoana GNSS-järjestelmänä GPS:n ohella maailmanlaajuisia PNT-palvelua siviili- ja viranomaiskäyttöön. (IAC 2, n.d.)

GLONASS-järjestelmä hyödyntää kolmea taajuutta GPS:n tapaan, jotka ovat 1602 MHz (G1), 1246 MHz (G2) ja 1207.14 MHz (G3). Käytännössä G1-taajuusalueella lähetetään signaalia 1598.0625-1609.3125 MHz välillä ja G2-taajuusalueella 1242.9375-1251.6875 MHz välillä. Tämä johtuu erilaisesta kanavointitekniikasta, jota GLONASS-järjestelmä käyttää näillä taajuusalueilla. Tekniikka on FDMA (Frequency Division Multiple Access) -kanavointi, jossa satelliittien lähettämät signaalit erotellaan eri taajuuksilla eli jokaisella satelliitilla on oma yksilöllinen taajuus. Kaikki muut GNSS-järjestelmät käyttävät CDMA (Code Division Multiple Access) -kanavointia, jossa signaalit erotellaan yksilöllisen koodin perusteella, mutta taajuus ei muutu. Kaikilla GLONASS-taajuusalueilla lähetetään useita signaaleja eri käyttötarkoituksiin. (ESA 2, 2011)

Ensimmäiset GLONASS-järjestelmän satelliitit hyödynsivät G1- ja G2-taajuusalueita. Ainoastaan G1 tarjosi C/A-koodilla lähetettävää SPS-palvelua ja molemmat taajuusalueet tarjosivat viranomaiskäyttöön P(Y)-koodilla lähetettävää PPS-palvelua. (ESA 2, 2011) Kuvassa 5 esitellään GLONASS-järjestelmän käyttämät signaalit ja taajuudet eri satelliittityypeittäin.



Kuva 5. GLONASS-järjestelmän signaalit. (ESA 2, 2011)

Nykypäivänä SPS- ja PPS-palvelua tarjotaan kolmella eri taajuusalueella uusimman G3-taajuusalueen myötä. Jokaisella taajuusalueella on käytössä siviili- ja viranomaiskäyttöön tarkoitetut signaalit. G3-taajuusalueen signaalit hyödyntävät CDMA-kanavointia. Tulevaisuudessa GLONASS-järjestelmään lisätään uusien satelliittilaukaisujen myötä kaksi uutta siviilisignaalia ja kaksi viranomaisignaalia, joiden kanavointitekniikkana hyödynnetään CDMA:ta. (ESA 2, 2011)

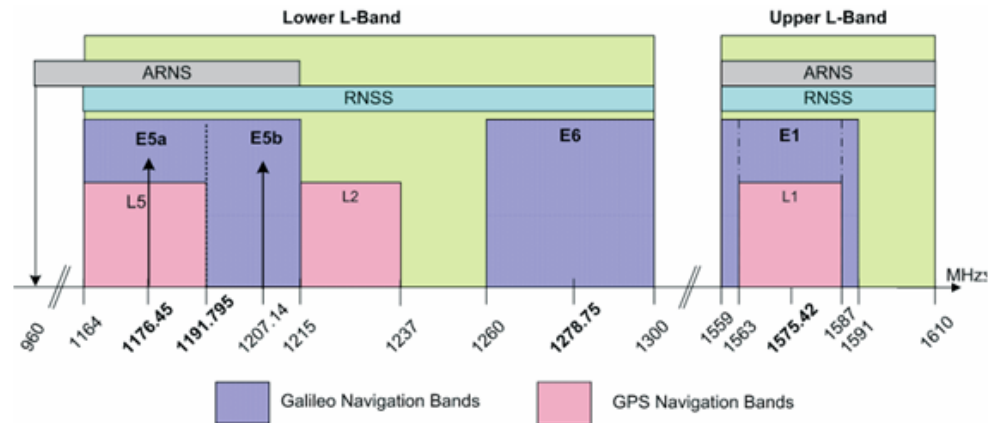
2.1.3 Galileo

Galileo on eurooppalainen siviilitoimijoiden hallinnoima satelliittipaikanusjärjestelmä. Järjestelmää operoi GSA (European Global Navigation Satellite Systems Agency). Galileo tarjoaa muiden järjestelmien ohella itsenäistä PNT-palvelua maailmanlaajuisesti ilmaiseksi käyttäjilleen. Ennen Galileon käyttöönottoa satelliittipaikannuksen käyttäjien oli turvauduttava ainoastaan eri maiden asevoimien hallinnoimiin järjestelmiin, kuten GPS:ää ja GLONASS:ia, mutta Galileon myötä käyttäjille tarjotaan luotettava vaihtoehto, johon ei vaikuta minkään maan asevoimien päätökset. (GSA2, 2018)

Testaustoimintaan tarkoitetut Galileo-järjestelmän satelliitit laukaistiin vuosina 2005 ja 2008. Vuosina 2011 ja 2012 laukaistiin ensimmäiset operatiiviseen käyttöön suunnitellut satelliitit ja vuoteen 2018 asti laukaistiin joka vuosi uusia satelliitteja. Järjestelmä saavutti esi-operatiivisen vaiheen vuonna 2016, jolloin Galileon tarjoamaa PNT-palvelu voitiin käyttöönottaa. Tällä hetkellä Galileo-järjestelmä koostuu 22 operatiivisessa käytössä olevasta satelliitista. Järjestelmän suunnitellaan saavuttavan täysi operatiivinen vaihe vuoden 2020 aikana, jolloin sen on määrä koostua 30 satelliitista. (GSA2, 2018)

Galileo hyödyntää kolmea eri taajuutta, jotka ovat 1575.42 MHz (E1), 1191.795 MHz (E5) ja 1278.750 MHz (E6). Lisäksi E5-alue jaetaan vielä kahteen osaan, jotka ovat 1176.450 MHz (E5a) ja 1207.140 MHz (E5b). Järjestelmä käyttää CDMA-kanavointia. (NovAtel 1, 2015, s. 41)

Kuvassa 6 näkyy Galileon taajuusalueet ja niiden sijoittuminen GPS:n taajuuksien kanssa.



Kuva 6. Galileon taajuusalueet (GSA 2, 2018)

Galileon täydessä operatiivisessa vaiheessa järjestelmä tuottaa neljää erilaista palvelua, joita ovat Open Service (OS), High Accuracy Service (HAS), Public Regulated Service (PRS) ja Search and Rescue Service (SAR). OS on vastaava palvelu kuin GPS:n avoin ilmainen SPS ja sillä tuotetaan PNT-palvelua suurelle käyttäjämassalle. Palvelua välitetään E1 ja E5 taajuuksilla. HAS on OS:n täydentävä palvelu, joka tarjoaa eri taajuudella tarkempaa paikannustarkkuutta käyttäjille. HAS käyttää E6 taajuusalueita. Palvelu on mahdollista myös salata, jos sen käyttöä halutaan säännellä. PRS on vastaava palvelu kuin GPS:n PPS. PRS on salattu viranomaiskäyttöön suunniteltu toimintavarmempi ja paremmin häirintää kestävä signaali. Palvelua tuotetaan E1 ja E6 taajuuksilla. SAR on pelastuspalvelu, jonka on tarkoitus paikantaa ja välittää hätätilassa olevien laivojen, lentokoneiden tai muiden käyttäjien lähettämää hätäsignaalia. Palvelu on maailmanlaajuinen ja Galileo on ainut järjestelmä, joka tarjoaa tätä ominaisuutta. SAR käyttää E1 alueen sivussa olevaa taajuutta 1544.1 MHz. (GSA2, 2018)

2.1.4 BeiDou

BeiDou on kiinalainen satelliittipaikannusjärjestelmä, joka on suunniteltu alun perin Kiinan asevoimien käyttöön venäläisten ja amerikkalaisten vastaavan järjestelmän rinnalle. Järjestelmästä käytetään myös lyhennettä BDS. Operoivana tahona toimii Kiinan avaruushallinto. Myös BDS tarjoaa käyttäjilleen maailmanlaajuisesti ilmaista PNT-palvelua. (BeiDou, 2018)

Kiinalaiset ryhtyivät kehittämään omaa satelliittipaikannusjärjestelmäänsä 1980-luvun aikana ja suunnittelivat kolmivaiheisen ohjelman järjestelmän kehittämiseksi. Ensimmäisen vaiheen, jota kutsuttiin nimellä BDS-1, oli tarkoitus valmistua vuoden 2000 loppuun mennessä ja sen tuli tarjota toimivaa palvelua koko Kiinan alueelle. BDS-2 vaiheen valmistumisen takaraja

oli vuoden 2012 loppu ja sen tarkoitus oli tuottaa toimivaa palvelua Aasian-Tyynenmeren alueelle. Viimeisen BDS-3 vaiheen oli alun perin määrä valmistua vuoden 2020 loppuun mennessä ja tarjota maailmanlaajuisista palvelua, mutta tämä vaihe on jo saavutettu, koska BDS julistettiin täysin operatiiviseksi jo vuoden 2018 lopussa. Järjestelmään kuuluu tällä hetkellä 34 operatiivisessa käytössä olevaa satelliittia. (BeiDou, 2018)

BDS-järjestelmä hyödyntää viittä taajuutta, jotka ovat 1575.42 MHz (B1C/A), 1561.098 MHz (B1I), 1176.45 MHz (B2a), 1207.14 MHz (B2I/b) ja 1268.52 MHz (B3I/Q/A). B2I taajuusalueen signaalit korvataan vaiheittain B2a taajuusalueen signaaleilla uusien BDS-3 vaiheen satelliittien myötä. BDS-järjestelmä käyttää CDMA-kanavointia. (BeiDou, 2018)

BDS tarjoaa kahta eri palvelua, jotka ovat Open Service (OS) ja Authorized Service (AS). OS on ilmainen ja avoin maailmanlaajuisesti PNT-palvelua tarjoava palvelu. BDS käyttää OS:n lähettämiseen tällä hetkellä kaikkia viittä taajuutta. AS on muiden GNSS-järjestelmien käyttämien viranomaiskäyttöön tarkoitettujen palveluiden kaltainen. Kiinalaisten vastineesta löytyy hyvin vähän tietoa avoimista lähteistä. Kuvassa 7 on esitetty OS:n ja AS:n käyttämät taajuudet. AS käyttää B1 ja B3 taajuusalueita, joissa on AS:lle suunnatut signaalit B1A, B3Q ja B3A. Kuvasta puuttuu B2I, koska kaikki kuvan taajuudet ovat uusien BDS-3 satelliittien käyttämiä taajuuksia. (BeiDou, 2018; ks. myös Lu, 2018)

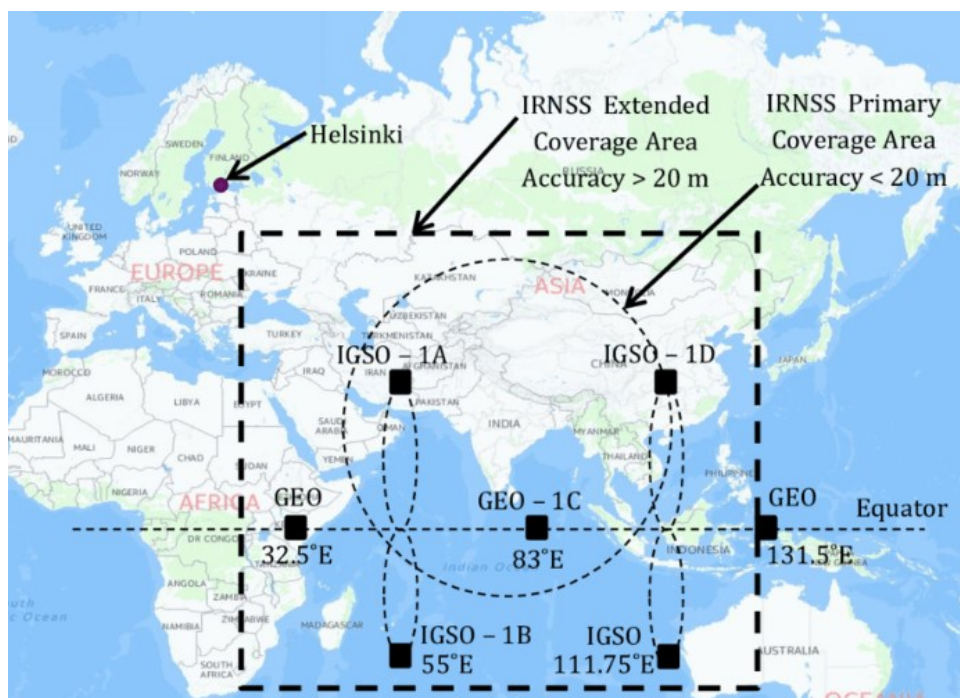
BDS III Signal Characteristics				
Signal Component	Carrier Frequency (MHz)	Code Rate (Mcps)	Modulation Scheme	Service Type
B1I	1561.098	2.046	BPSK	OS
B1C	1575.42	1.023	QMBOC	OS
B1A		N/A	N/A	AS
B2a	1176.45	10.23	ACE-BOC	OS
B2b	1207.14	10.23		OS
B3I	1268.52	10.23	BPSK	OS
B3Q		N/A	N/A	AS
B3A		N/A	N/A	AS

Kuva 7. BDS-järjestelmän taajuudet ja palvelut. (Lu, 2018, s. 13)

2.2 NavIC

IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) on intialainen satelliittipaikannusjärjestelmä, joka nimettiin uudestaan vuonna 2016 ja siitä käytetään nykyään nimitystä NavIC (Navigation with Indian Constellation). Jär-

jestelmän omistaa Intian valtio ja sitä operoi ja kehittää Intian avaruustutkimusjärjestö. NavIC-järjestelmän muodostaa GNSS-järjestelmien tapaan avaruus-, hallinta- ja käyttäjäsegmentit. Intian satelliittipaikannusjärjestelmää ei luokitella kuuluvaksi GNSS-järjestelmiin, koska se tarjoaa paikannuspalveluita pääalueellaan vain Intiassa, ulottuen noin 1500 kilometriä rajojen ulkopuolelle. Alueeseen kuuluu myös laajennettu peittoalue. Alueet näkyvät kuvassa 8. (ESA 3, 2011; ks. myös Zahidul ym., 2015)



Kuva 8. NavIC-järjestelmän peittoalueet. (Zahidul ym., 2015)

Intian valtio hyväksyi IRNSS-hankeen vuonna 2006 ja vuonna 2013 laukaisiin järjestelmän ensimmäinen satelliitti. Nykypäivänä operatiivisessa käytössä on 8 satelliittia ja paikannuspalvelu on käytössä rajoitetusti. (ESA 3, 2011) Rajoitus johtuu lähinnä NavIC-signaalien vastaanottoon suunnattujen laitteiden niukkuudesta käyttäjäsegmentillä. Paikannuspalvelu on ollut pääosin vain ammatilaiskäytössä. (Kumar, 2018)

NavIC hyödyntää kahta taajuutta, jotka ovat GPS:n tapaan 1176.45 MHz (L5) ja täysin muista poikkeava 2492.028 MHz (S). Kanavointitapana käytössä on CDMA. Järjestelmä tarjoaa kahta palvelua, jotka ovat GNSS-järjestelmistä tutut avoin ilmainen Standard Positioning Service (SPS) ja rajoitettu Precision Service (PS). Molempien palveluiden tarjoamiseen käytetään molempia taajuuksia. (ESA 3, 2011)

2.3 QZSS

QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) on japanilainen satelliittipaikannusjärjestelmä, joka on suunniteltu käytettäväksi yhdessä GPS-järjestelmän

kanssa. Yhdessä QZSS ja GPS tuottavat vakaampaa ja tarkempaa paikannusta. Järjestelmää operoi yhtiö nimeltä Quasi-Zenith Satellite System Services Inc. QZSS:n ensimmäinen satelliitti laukaistiin vuonna 2010 ja vuonna 2017 järjestelmää täydennettiin kolmella satelliitilla. Vuonna 2018 QZSS julistettiin toimivaksi satelliittipaikannusjärjestelmäksi. Tällä hetkellä järjestelmä koostuu neljästä satelliitista, mutta sitä on tarkoitus täydentää lähivuosina vielä kolmella uudella satelliitilla. Järjestelmään kuuluu GNSS-järjestelmien tapaan avaruus-, hallinta- ja käyttäjäsegmentit. Myöskään QZSS-järjestelmää ei luokitella GNSS-järjestelmäksi, koska se tarjoaa PNT-palvelua vain paikallisesti Japanissa ja sen lähialueilla. (QZSS, n.d.)

QZSS hyödyntää neljää eri taajuusaluetta, jotka ovat 1575.42 MHz (L1), 1227.6 MHz (L2), 1176.45 MHz (L5) ja 1278.75 MHz (L6). Lisäksi järjestelmässä on käytössä 2 GHz:n (S) alue, jota hyödynnetään turvallisuustiedotteiden välittämiseen. Kanavointitapana käytössä on CDMA. QZSS tarjoaa ilmaista ja kaikille avointa PNT-palvelua L1-, L2- ja L5-taajuusalueilla samaan tapaan kuin GPS. Lisäksi järjestelmä tuottaa tarkempaa paikannusta korjaussignaalien avulla, joita lähetetään L1- ja L6-taajuusalueilla. Korjauspalvelut ovat nimeltään Sub-meter Level Augmentation Service (SLAS) ja Centimeter Level Augmentation Service (CLAS). CLAS on tarkempi tarjoten senttimetriluokan tarkkuutta. Käytössä on myös vielä tällä hetkellä kokeellisia signaaleja L5- ja L6-taajuusalueilla. Käytetyt taajuudet ja signaalit sekä niiden palvelut näkyvät kuvassa 9. (QZSS, n.d.)

Ranging Signals of QZSS

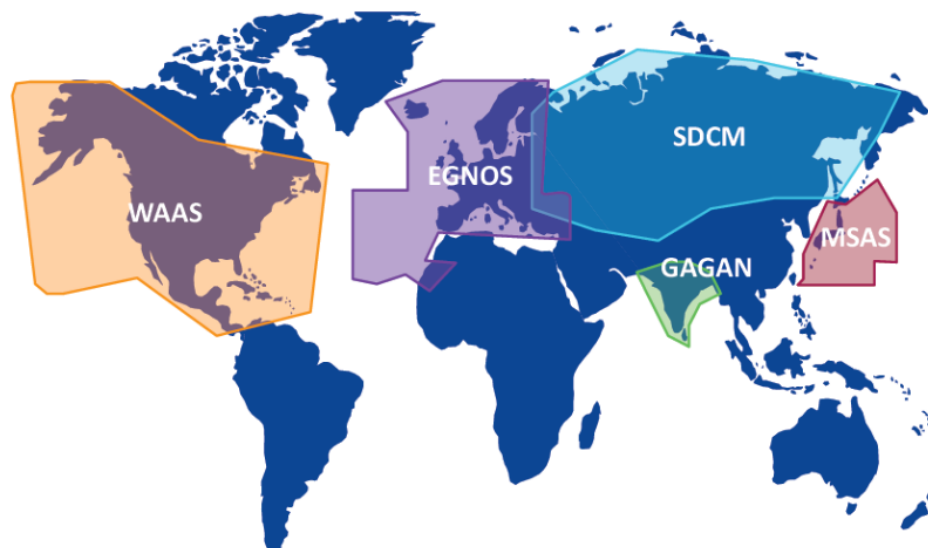
Signal	Frequency MHz	Service	Compatibility	QZS-1	QZS-2/4	QZS-3
				IGSO	IGSO	GEO
L1C/A	1575.42	Positioning	Complement GPS	✓	✓	✓
L1C		Positioning	Complement GPS	✓	✓	✓
L1S		Augmentation(SLAS)	DGPS (Code Phase Positioning)	✓	✓	✓
		Messaging	Short Messaging	✓	✓	✓
L1Sb		Augmentation(SBAS)	SBAS (L1) Service	-	-	✓
L2C	1227.60	Positioning	Complement GPS	✓	✓	✓
L5 I/Q	1176.45	Positioning	Complement GPS	✓	✓	✓
L5S		Experimental(L5 SBAS)	L5 SBAS (DFMC)	-	✓	✓
L6D	1278.75	Augmentation(CLAS)	PPP-RTK (Carrier Phase Positioning)	✓	✓	✓
L6E		Experimental(MADOCA)	PPP, PPP-AR (Carrier Phase Positioning)	-	✓	✓

Kuva 9. QZSS-järjestelmän käyttämät taajuudet, signaalit ja palvelut. (QZSS 2, 2018)

2.4 SBAS

SBAS:lla (Satellite-based Augmentation Systems) tarkoitetaan satelliittipohjaista parannusjärjestelmää, joka kasvattaa GNSS-järjestelmien suorituskkyä korjaamalla alkuperäisen signaalin virheitä tehden paikannuksesta tarkemman ja luotettavamman. SBAS ei varsinaisesti kuulu GNSS-järjestelmiin, mutta on oleellinen osa globaalia satelliittipaikannusta.

Alueellisia järjestelmiä ovat Euroopan Unionin EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), USA:n WAAS (Wide Area Augmentation System), Japanin MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System), Intian GAGAN (GPS Aided GEO Augmented Navigation), Kiinan SNAS (Satellite Navigation Augmentation System) ja Venäjän SDCM (System for Differential Corrections and Monitoring). (GSA3, 2019) Kuvassa 10 esitetään alueellisten SBAS-järjestelmien käyttöalueet. Lisäksi suunnitteilla on muitakin satelliittipohjaisia parannusjärjestelmiä.



Kuva 10. Alueelliset SBAS-järjestelmät. (GSA3, 2019)

SBAS-järjestelmät koostuvat GNSS-järjestelmien tapaan avaruus-, hallinta- ja käyttäjäsegmenteistä. Kunkin järjestelmän avaruussegmenttiin kuuluu tyypillisesti muutama GEO-alueen satelliitti. Satelliitit lähettävät korjaustietoa käyttäjäsegmentille L1-taajuualueella. (ESA 4, 2011)

Hallintasegmenttien kokonaisuus muodostuu tyypillisesti useasta toiminnosta. Näitä ovat monitorointiasemat, prosessointilaitokset, satelliittien kontrollointiasemat ja tietoliikennekeskukset, joiden tehtävänä on yhdistää kaikki toiminnot yhdeksi kokonaisuudeksi. Koko hallintasegmentin päätehtävänä on analysoida kyseessä olevan GNSS-järjestelmän signaalit ja luoda korjaustieto, joka lähetetään SBAS-satelliitille. Korjattu informaatio välitetään satelliitista takaisin maahan käyttäjille. (ESA 4, 2011)

Käyttäjäsegmentti koostuu kaikista käyttäjien laitteista, jotka hyödyntävät SBAS-korjausdataa. Järjestelmä on erityisen tärkeä esimerkiksi siviili-ilmailussa, koska sitä käytetään lentokoneiden laskeutumisessa lähestymismenetelmänä. Yksistään mikään GNSS-järjestelmä ei tuota riittävän tarkkaa paikannusta, eikä tämä menetelmä myöskään täytä kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön tarkkoja operatiivisia vaatimuksia, mutta SBAS:n avulla vaatimukset täyttyvät. (ESA 4, 2011)

SBAS-järjestelmä tarjoaa SoL (Safety of Life service) -palvelua, jota myös ilmailussa käytetään. Lisäksi tätä voidaan hyödyntää muissa tarkkuus- ja turvallisuuskriittisissä toiminnoissa. Toinen tarjottava palvelu on OS (Open Service) -palvelu, jota voidaan käyttää avoimena palveluna parempaa tarkkuutta vaativiin toimintoihin, kuin mitä pelkästään GNSS-järjestelmät tarjoavat. SBAS ei ole toimiva yksistään, vaan vaatii aina jonkin GNSS-järjestelmän, jonka tarkkuutta parannetaan. (ESA 4, 2011)

3 SATELLIITTIPAIKANNUKSEN PERUSTEET

Satelliittipaikannus perustuu satelliitin lähettämän signaalin kulkuajan määrittämiseen, jonka perusteella pystytään mittaamaan satelliitin ja vastaanottimen välinen etäisyys. Vastaanottimen paikan määrittämiseen tarvitaan vähintään neljän eri satelliitin signaalit. Tässä kappaleessa selvitetään yleisesti satelliittipaikannuksen toimintaperiaate ja signaalin perusrakenne sekä kuvataan erilaisia vastaanottimia GNSS-signaalien vastaanottoon.

3.1 Vastaanottimet

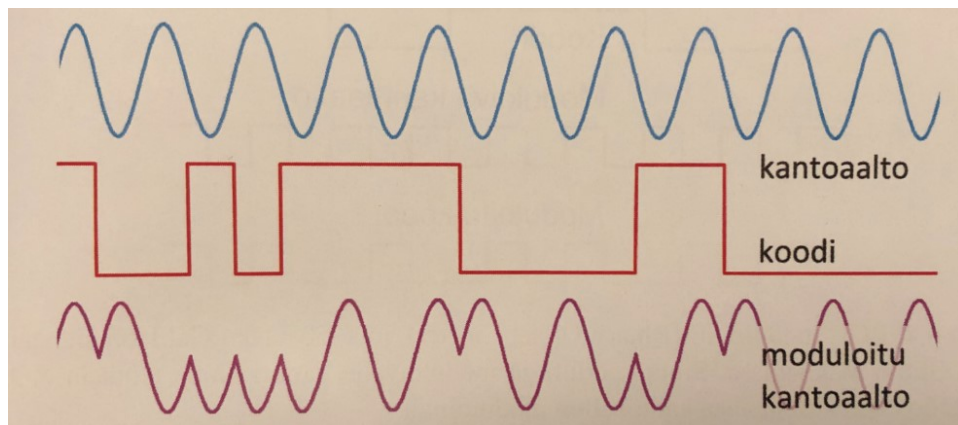
GNSS-paikanmäärittäykseen tarvitaan aina vastaanotin. Vastaanottimia on valmistettu lukuisiin eri käyttötarkoituksiin, kuten navigointiin, maanmittaukseen ja tarkkaa aikaa vaativiin toimintoihin. Jokainen GNSS-järjestelmä lähettää erilaista signaalia, joten esimerkiksi vain BeiDoun signaaleja vastaanottamaan suunnitellulla vastaanottimella ei voi havaita GPS:n lähettämiä signaaleja. Myös antennin valinnalla on merkitystä, koska jotkin antennit saattavat vastaanottaa vain tiettyä taajuusalueita suodattimien takia. (Poutanen, 2016, s. 15 - 16)

Vastaanottimen käyttötarkoitus ohjaa pitkälti sen valintaa, koska vastaanottimia on myös lukuisia eri tyyppisiä vastaanotettavien signaalien perusteella. Vastaanotintyyppinä ovat yksi-, kaksi- ja monitaajuusvastaanottimet sekä vain yhden tai useamman GNSS-järjestelmän signaalia havaitsevat vastaanottimet. Esimerkiksi navigointiin käytetään tyypillisesti vastaanottimia, jotka havaitsevat vain GPS:n L1-taajuusalueella lähetettävää C/A-koodillista signaalia. Kaksi- ja monitaajuusvastaanottimet ovat sellaisia, jotka vastaanottavat esimerkiksi vain GPS:n L1- ja L2-taajuusalueita tai kaikkia kyseisen järjestelmän taajuuksia. Useamman GNSS-järjestelmän signaaleja havaitseva monitaajuusvastaanotin puolestaan kykenee havaitsemaan kaikkien GNSS-järjestelmien kaikkia taajuuksia. Tavalliselle kuluttajalle ei ole saatavilla vastaanottimia, joilla pystyisi havaitsemaan rajoitettuja viranomaiskäyttöön tarkoitettuja GNSS-signaaleja. Tätä varten tarvitaan kyseisen signaalin käyttöön valmistettu vastaanotin, mutta esimerkiksi GPS:n P-koodia varten löytyy menetelmiä, joilla kyseistä signaalia on mahdollista hyödyntää siviilikäyttöönkin. (Poutanen, 2016, s. 15 - 16) Monitaajuusvastaanottimet tulevat kyseeseen luotettavuutta ja tarkkuutta vaativien sovellusten suunnittelussa kuten autonomisten ajoneuvojen paikannusratkaisuissa.

3.2 GNSS-signaalien rakenne

Satelliittien lähettämien signaalien pääkomponentti on kantoaalto. Tähän on moduloitu yksittäisen satelliitin tunnistukseen tarkoitettu PRN (Pseudo Random Noise) -koodi ja navigointiviesti. Kuvassa 11 on esitetty kantoaalto

ja moduloitu kantaalto. Kuten jo aiemmin kerrottiin, CDMA-kanavointi perustuu koodierotteluun ja FDMA-kanavointi taajuuserotteluun. Käytännössä CDMA-kanavointia käyttävien järjestelmien signaalit sisältävät yksilöllisen kantaaltoon moduloidun koodin, jolla yksittäisen satelliitin signaalit ovat eroteltavissa. FDMA-kanavoinnissa kaikki satelliitit lähettävät samoilla koodeilla moduloituja signaaleja ja erottelu tapahtuu yksilöllisillä taajuuksilla. Tämä vaatii suuremman taajuusalueen käytön. (Poutanen, 2016, s. 165 - 166)



Kuva 11. Signaalin modulointi. Koodin tilan muuttuessa kääntyy kantaallon vaihe 180 astetta, jolloin syntyy moduloitu kantaalto. (Poutanen, 2016, s. 167)

Kantaaltoon moduloitujen koodien rakenne on erittäin monimutkainen ja tähän on syynä se, että alun perin tämä tekniikka kehitettiin sotilaskäyttöön sen hyvän häiriönsietokyvyn johdosta. Monimutkaisuudella on etuna myös se, että sillä mahdollistetaan maahan saapuessaan erittäin heikkojen signaalien havaitseminen kohinan alta. Koodi ei sisällä selväkielistä tietoa, vaan sen tarkoitus on mahdollistaa vastaanottimessa etäisyyden ja ajan tarkka määrittely. Vaikka PRN-koodi on pseudosatunnainen, niin on se silti erittäin tarkasti määritelty tarkan algoritmin toimesta. Navigointiviesti sisältää puolestaan tietoa satelliitin kunnosta ja toiminnasta sekä paljon muuta informaatiota kuten satelliitin kellon korjaustietoja, satelliitin rata-tietoja, almanakkatietoja ja ionosfäärin parametreja, joita vastaanotin tarvitsee määrittääkseen sijainnin. (Poutanen, 2016, s. 165 - 166)

GNSS-järjestelmät käyttävät kahta erilaista kantaallon modulointitapaa. Nämä ovat BPSK (Binary Phase Shift Keying) ja BOC (Binary Offset Carrier). BPSK:ta käyttävät GPS, GLONASS ja BeiDou. Tämä modulointitapa on esitetty kuvassa 11. Vastaanotin korreloi vastaanotetun signaalin koodin kopiolla, jonka se on tuottanut. Vastaanottimella on oltava tiedossa koodin tuottava algoritmi parametreineen, jotta se voi rekonstruoida koodin. Koodin korrelaation havaitseminen onnistuu vain, jos koodi on oikea ja se on täysin samassa vaiheessa. (Poutanen, 2016, s. 165 - 166)

BOC-modulointia käyttää Galileo ja GPS M-koodin osalta, joka on P(Y)-koodin rinnalla toinen kyseisen järjestelmän viranomaissignaaleissa käytettävä

koodi. BOC:ssa koodi kerrotaan ensin kanttiaallolla, jonka jälkeen suoritetaan modulointi. BOC ja BPSK eroavat toisistaan spektrin energian jakaantumisessa. BOC:ssa energia jakaantuu kyseessä olevan taajuuskaistan sivuille, ikään kuin kahtia jakaantuneena. BPSK:ssa energia on keskittynyt kyseessä olevan taajuuskaistan kantoaallon keskitaajuudelle. (Poutanen, 2016, s. 165 - 166)

3.3 Koodiin perustuva paikannus

GNSS-signaaleihin moduloitujen koodien käyttö paikan määrittämiseen on yleisin ja yksinkertaisin tapa. Koodin avulla voidaan määrittää signaalin kulku-aika, jonka perusteella selvitetään satelliitin ja vastaanottimen välinen etäisyys. Tällä menetelmällä saadaan parhaimmillaan noin metrin paikannustarkkuus. Koodin perusteella tuotettavaa etäisyystietoa kutsutaan koodipseudoetäisyydeksi. (Poutanen, 2016, s. 174 - 175)

Navigointi on yleisin ja yksi tärkeimmistä sovelluksista siviilikäytössä. Koodipaikannuksella saatava muutaman metrin tarkkuus on riittävä tavalliseen navigointiin esimerkiksi autolla ajaessa tai paikan sijoittamiseksi kartalle. Suurin osa halvimista tavallisten kuluttajien navigaattoreista ja muista paikannukseen kykenevistä laitteista käyttää tätä menetelmää. Navigointi tapahtuu tavallisesti yhden vastaanottimen avulla, eikä siinä käytetä ulkoista korjausta. Tätä yhden vastaanottimen menetelmää kutsutaan absoluuttiseksi paikannukseksi, koska paikanmäärittäminen tapahtuu globaalissa vertauskehityksessä GNSS-satelliittien avulla, eikä esimerkiksi toisen vastaanottimen suhteen. (Poutanen, 2016, s. 13)

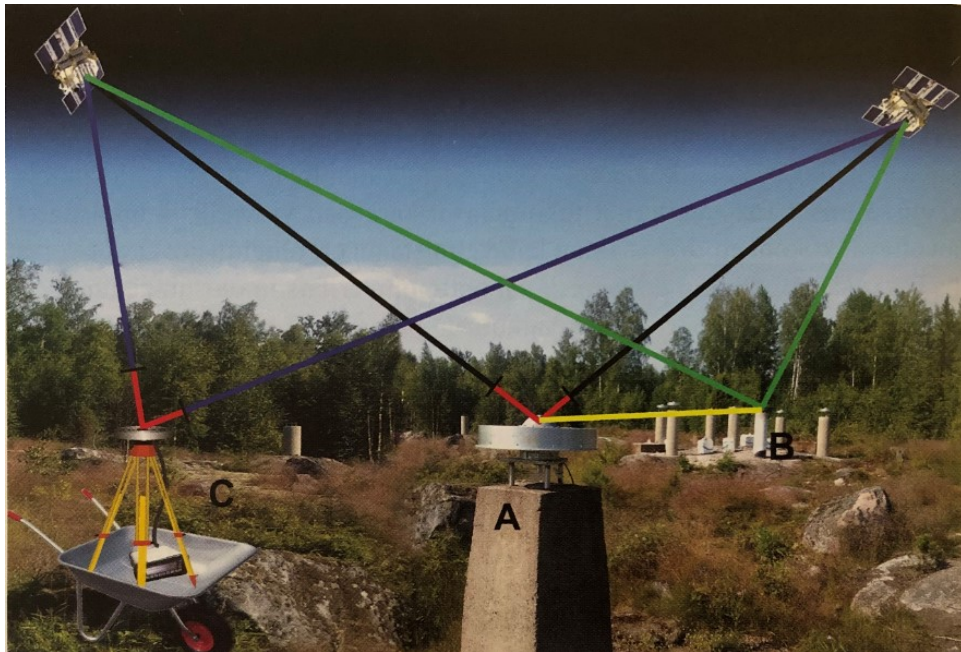
Muutaman metrin paikannustarkkuuden sijaan, joissain toiminnoissa saatavaa olla tarve tarkemmalle paikannukselle. Tällöin voidaan käyttää koodipaikannusta käyttävää kahden vastaanottimen menetelmää, jolloin päästään parhaimmillaan jopa puolen metrin tarkkuuteen. Toinen vastaanotin toimii tukiasemana tunnetussa sijainnissa, joka vertaa sen todellista sijaintia tukiasemavastaanottimen hetkellisiin mittaustuloksiin ja välittää vertauksista saatavaa virhekorjaustietoa reaaliaikaisesti toiselle liikkuvalla vastaanottimella saatavilla olevalla tiedonsiirtomenetelmällä. Välitettävä korjaustieto sisältää kullekin satelliitille tehtävän etäisyyden korjauksen. Ennen oman paikkansa määrittämistä liikkuva vastaanotin tekee tarvittavat korjaukset mittauksiin. Tätä tukiasemamenetelmää kutsutaan differentiaaliseksi paikannukseksi (DGNSS). Suomessa on pysyviä GNSS-tukiasemaverkkoja, jotka mahdollistavat tarkemman ja luotettavamman korjauksen, koska korjaustieto määritetään koko verkon avulla luodun korjauspinnan perusteella. Yksi verkoista on Maanmittauslaitoksen ylläpitämä ja se on nimeltään FinnRef. Verkon avulla päästään kaikkialla Suomessa noin puolen metrin tarkkuuteen optimaalisissa olosuhteissa. (Poutanen, 2016, s. 13-14)

3.4 Kantoaaltoon perustuva paikannus

Vaikka metritarkka paikannus riittää moniin sovelluksiin ja on eniten käytetty paikannusmenetelmä, niin tarvitsevat tietyt mittaukset sekä käyttökohteet paljon parempaa tarkkuutta. Esimerkiksi maanmittaukseen, geodeettisiin mittauksiin ja älyliikenteen tarpeisiin ei riitä metritarkka koodipaikannus. Kantoaaltoon perustuva paikannus perustuu kantoaallon aallonpituuksien lukumäärän laskemiseen satelliitin ja vastaanottimen välillä. Tähän tarvitaan tieto kantoaallon aallonpituudesta, joka on erilainen kaikille taajuuksille. Signaalista selvitetään missä vaiheessa se on saapuessaan vastaanottimeen, jolloin on mahdollista saavuttaa hyvin tarkkoja mittaus tuloksia. Kantoaallon perusteella suoritettua etäisyysmittausta kutsutaan vaihepseudotäisyydeksi. (Poutanen, 2016, s. 14, s. 177)

Millimetritarkka paikannus saavutetaan suhteellisilla mittauksilla, mikä tarkoittaa sitä, että mittaus suoritetaan vähintään kahden vastaanottimen avulla kantoaaltoon perustuen. Tällä menetelmällä selvitetään tuntemattoman vastaanottimen paikka tunnetussa paikassa olevan tukiaseman suhteen. Kuvassa 12 on esitetty suhteellinen ja differentiaalinen paikanmäärittäminen. Millimetri- ja senttimetritarkkuudet saavutetaan monimutkaisella suurta laskentatehoa vaativalla laskennalla, mikä oli pitkään esteenä sille, että laskentaa ei pystytty suorittamaan reaaliajassa. 2000-luvun alussa reaaliaikainen mittaus kasvoi nopeasti, kun laskentateho ja algoritmit kehittyivät. Reaaliaikaisesta mittaamisesta kantoaallon avulla käytetään lyhennettä RTK (Real-Time Kinematic). (Poutanen, 2016, s. 15)

Suhteelliset paikanmäärittämittaukset voidaan jakaa vielä kahteen luokkaan, jotka ovat kinemaattiset ja staattiset. Suhteellinen kinemaattinen paikannus tarkoittaa käytännössä RTK:ta. Tämä voidaan tehdä reaaliajassa tai jälkilaskentana. RTK-mittauksissa voidaan käyttää myös tukiasemaverkkoa. Reaaliaikaisella mittauksella päästään senttimetritarkkuuksiin ja mittauksissa tulee olla kaksi- tai monitaajuusvastaanottimet. Staattinen suhteellinen paikannus tapahtuu samaan tapaan kuin tavallinen RTK, mutta siinä molemmat vastaanottimet ovat paikallaan tunnetuissa pisteissä. Tällä menetelmällä mittausajat voivat olla muutamia minuutteja paikallaan olevissa liikuteltavissa vastaanottimissa tai mittauksiin voidaan käyttää pysyviä tukiasemia. Staattinen suhteellinen paikannus on kaikista paikannustavoista tarkin. Mittaukset suoritetaan yleensä jälkilaskentana. (Poutanen, 2016, s. 262 - 266)



Kuva 12. Suhteellinen ja differentiaalinen paikanmääritys. Suhteellinen paikanmääritys tapahtuu laskemalla tukiaseman (A) ja vastaanottimen (B) välinen vektori. Differentiaalista menetelmää käyttäen todellisen ja havaitun etäisyyden välinen ero (punainen jana) satelliitteihin lasketaan tukiasemalla (A) ja tämä korjaustieto välitetään liikkuvalla vastaanottimelle (C). (Poutanen, 2016, s. 14)

Senttimetritarkkuuksiin voidaan päästä ilman tukiasemaa myös yhden vastaanottimen avulla, joka hyödyntää kantoaaltoon perustuvaa mittausta. Menetelmää kutsutaan lyhenteellä PPP (Precise Point Positioning). Tämä vaatii tiedot satelliittien tarkoista ratatiedoista, kellokorjauksista ja Maan asentoparametreista. Vaatimuksena on myös, että vastaanotin on tehnyt samassa pisteessä mittauksia riittävän ajan. Tähän yhden vastaanottimen paikannukseen tarvitaan kaksi- tai monitaajuusvastaanotin ja mittausta tulee tehdä staattisesti noin tunnin ajan. PPP tulee olemaan tulevaisuudessa yhä merkittävämpi mittausmenetelmä, jolloin tarkka paikanmääritys voidaan tehdä reaaliajassa. Tämä vaatii tekniikan ja algoritmien kehitystä. (Poutanen, 2016, s. 268 - 270)

4 SATELLIITTIPAIKANNUKSEN HYÖDYNTÄMINEN TIELIIKENTEESSÄ

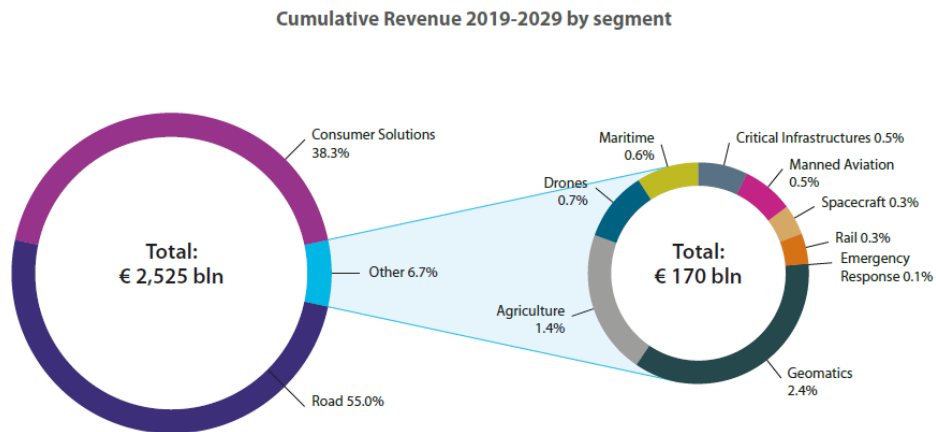
Tässä kappaleessa kuvataan merkittävimmät GNSS-pohjaiset sovellukset ja käyttökohteet tieliikenteessä nyt ja tulevaisuudessa. Ensimmäisessä alakappaleessa paneudutaan myös lyhyesti GNSS-markkinoiden globaaliin kehitykseen ja markkina-arvoon laitemäärien sekä palveluiden osalta.

4.1 Satelliittipaikannuksen markkinat

GNSS-järjestelmien tarjoamasta PNT-palvelusta on tullut internetin tapaan yksi maailman tukipilareista. Ilman sitä moni toiminto lakkaisi olemasta ja yhteiskunnan perustoiminnot romahtaisivat. Globaali GNSS-järjestelmien hyödyntäminen erilaisiin sovelluksiin ja käyttötarkoituksiin on ollut viime vuosina valtavassa kasvussa ja sen ennustetaan kasvavan edelleen merkittävästi. Uusien satelliittipaikannusjärjestelmien käyttöönotto, ilmastonmuutos ja uusien tekniikoiden sekä sovellusten kehitys ja tarve on vauhdittanut GNSS:n käyttöä entisestään. (GNSS Market Report, 2019, s. 6 - 11)

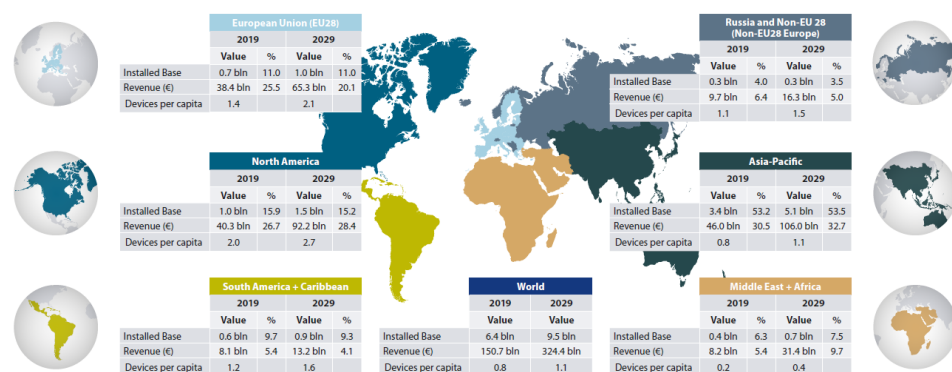
Satelliittipaikannuksen kehitys sekä sitä hyödyntävät sovellukset ja palvelut mahdollistavat ympäristöystävällisen toiminnan edistämisen ja sen avulla voidaan taistella ilmastonmuutosta vastaan. Hyötyjä saadaan esimerkiksi liikennepuolella GNSS-pohjaisten sovellusten kautta, jotka vähentävät tarpeetonta ajoa reittien suunnittelun ja ajantasaisen liikennetiedon kautta, jolloin maa-, meri- ja lentoliikenteen päästöt vähenevät. Myös maanviljelyssä voidaan optimoida toimintaa, mikä johtaa esimerkiksi lannoitteiden tarpeen vähenemiseen ja tätä kautta haitallisten päästöjen synty vähenee. Kehittyneillä GNSS-järjestelmillä saadaan hyötyjä myös meteorologiaan ja ilmastonmuutoksen monitorointiin. (GNSS Market Report, 2019, s. 19 - 20)

GNSS:n tuottamia paikannus-, navigointi- ja aikapalveluita hyödynnetään globaalisti lukuisissa käyttökohteissa. Näitä kohteita ovat esimerkiksi tieliikenteen useat sovellukset, lentoliikenne, laivaliikenne ja maanmittaus. Euroopan GNSS-viraston ennusteiden mukaan vuosina 2019-2029 markkina-arvoltaan ylivoimaisesti suurin 55% osuus on tieliikenteen segmentillä. Ennusteissa on otettu huomioon laitteiden ja palveluiden osuus. Kuvassa 13 esitetään GNSS-segmenttien osuudet kumulatiivisesta markkina-arvosta vuosina 2019-2029. (GNSS Market Report, 2019, s. 11)



Kuva 13. Kumulatiivinen markkina-arvo segmenteittäin. (GNSS Market Report, 2019, s. 11)

Tieliikennesegmentillä suurin osa markkina-arvosta muodostuu ajoneuvoihin integroiduista IVS (In-Vehicle Systems) -laitteista, ajoneuvokaluston hallintajärjestelmistä (Fleet Management) ja kehittyneistä kuljettajan avustusjärjestelmistä (ADAS) (GNSS Market Report, 2019, s. 11). Globaalisessa kehityksessä Aasian ja Tyynenmeren alue hallitsee suurimmalla markkina-arvon osuudella sekä käytössä olevien GNSS-vastaanottimien lukumäärällä. Kuvassa 17 näkyy alueellinen jako kokonaismarkkina-arvon ja vastaanotinten osuuden osalta vuoden 2019 tilanteesta ja vuoden 2029 arvioidussa tilanteesta. (GNSS Market Report, 2019, s. 6)



Kuva 14. Alueellinen markkina-arvon jako ja vastaanotinten määrä. (GNSS Market Report, 2019, s. 6)

4.2 Navigointi ja reittisuunnittelu

Ensimmäinen autoon suunniteltu navigaattori Iter Avto keksittiin jo vuonna 1930. Se perustui paperisiin karttakelmuihin, joita rullattiin auton liikkuaessa, eikä se suinkaan pohjautunut GNSS-järjestelmiin. Tästä muutama vuosikymmenen kuluttua satelliittipohjainen navigointi yleistyi ajoneuvoissa. 1990-luvulla kojelaudoille alkoi tulla navigaattoreita ja samaan aikaan yleistyi laitteiden tarjoama liikennetietopalvelu. (GSA 5, 2019)

Nykyään suuren osan ihmisistä tuntema ja hyödyntämä satelliittipohjainen navigointi on yksi käytetyimmistä GNSS-sovelluksista tieliikenteessä. Navigointia on perinteisesti käytetty ajoneuvolla ajettaessa löytämään paikasta A paikkaan B. Lisäksi tieliikenteessä navigointia voidaan hyödyntää jalan tai polkupyörällä liikuttaessa, huomioiden kuitenkin mahdolliset katvealueet metsissä ja kaupunkialueilla. Navigointia voidaan nykypäivänä hyödyntää useilla laitteilla. Monissa uusissa ajoneuvoissa on integroidut navigaattorit ja lähes jokaisella on älypuhelin, joka kykenee riittävän tarkkaan navigointiin esimerkiksi ajoneuvolla. Reitin määritykseen ja paikannukseen vaaditaan, että käytettävässä laitteessa on yksitaajuusvastaanotin tai useampataajuutta ja GNSS-järjestelmää hyödyntävä vastaanotin sekä karttasovellus, johon paikka ja reitti määritellään. (ESA 5, 2011)

Navigointisovellusten hyödyntäminen parantaa liikenteen tehokkuutta ja turvallisuutta. Tehokkuuden kasvaessa vähenee myös liikenteestä aiheutuvat päästöt. Hyötyihin päästään navigoinnin ja reittisuunnittelun yhteistoiminnalla. Monet navigointisovellukset tarjoavat liikenneilmoituksia ruuhkista, tietyömaista ja onnettomuuksista. Reaaliaikaisia liikennetietoja hyödyntämällä voidaan ajoreitti suunnitella uudestaan ja navigoida vaihtoehtoisia reittejä pitkin, jolloin ruuhkat vähenevät ja vältetään mahdolliset lisäonnettomuudet. (GSA 10, 2018)

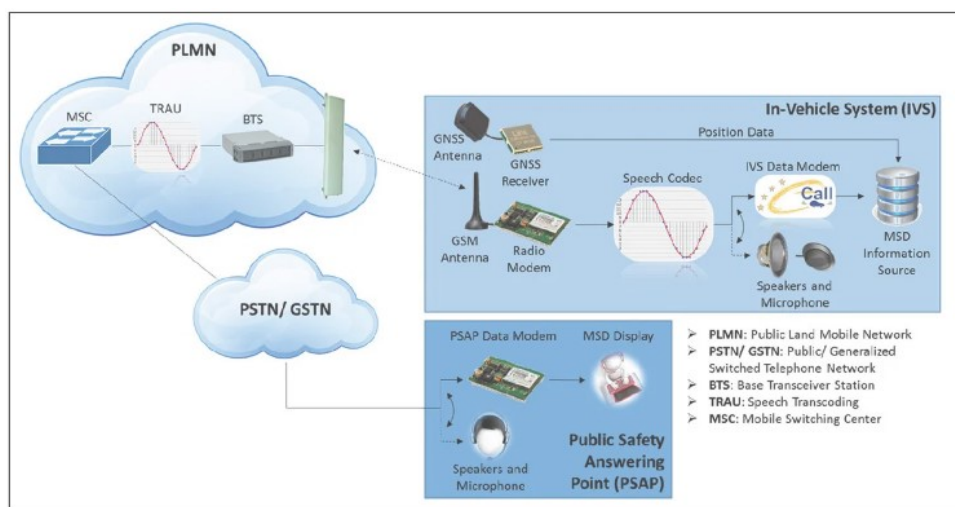
4.3 eCall

Automaattisesti hätäpuhelin soittava eCall-järjestelmä on autoon integroitu laitekoonpano, joka aktivoituu onnettomuustilanteessa. Järjestelmä lähettää hätäpuhelin yhteydessä onnettomuuteen joutuneen ajoneuvon sijainnin hätäkeskukseen. Paikannus perustuu GNSS-vastaanottoon. ECall on Euroopan Komission julkaisema palvelu, joka esiteltiin ensimmäistä kertaa vuonna 1999 Galileo projektin alussa. Vuonna 2015 Euroopan Parlamentti päätti, että eCall-laitteisto tulee asentaa kaikkiin Euroopan markkinoille tuleviin uusiin henkilö- ja pakettiautoihin huhtikuun 2018 jälkeen. Syynä päätökseen ja palvelun kehitykseen oli se, että usein onnettomuuteen joutuneiden ihmisten sijaintitietoisuus on heikko varsinkin kaupunkien ulkopuolella ja ulkomailla. Toisena merkittävänä syynä on onnettomuustilanteissa jumiin jääneiden tai vakavasti loukkaantuneiden kyvyttömyys soittaa hätäkeskukseen. (Inside GNSS 2, 2015)

eCall toimii Euroopan laajuisesti hyödyntäen Galileoa ja EGNOS-järjestelmää. Vähimmäisvaatimuksena eCall-vastaanottimelle on Galileo- ja EGNOS-tuki, mutta monet vastaanottimet hyödyntävät myös GPS:n ja GLONASS:n signaaleja, koska Venäjällä on käytössä eCall:ia vastaava järjestelmä ERA-GLONASS ja nämä voidaan integroida keskenään yhteensopiviksi. ECall perustuu koko Euroopan alueella toimivaan hätänumeroon 112, johon järjestelmään kuuluva sim-kortillinen modeemi soittaa onnettomuustilanteessa. Samalla aktivoituu myös paikanmääritys vastaanottimen toimesta. Hätäpuhelu välittyy koko Euroopan alueella paikallisen maan matkapuhelinverkkoa hyödyntäen paikalliseen hätäkeskukseen. Puhelun

yhteydessä välitetään MSD (Minimum Set of Data) -viesti, joka sisältää onnettomuuteen joutuneen ajoneuvon sijainnin WGS84 (World Geodetic System 1984) -koordinaatteina, kulkusuunnan onnettomuushetkellä, tiedon siitä aktivoituiko hälytys automaattisesti vai manuaalisesti ja ajoneuvon tunnistenumeron. (Inside GNSS 2, 2015)

Kuvassa 15 näkyy eCall-järjestelmän arkkitehtuurikuvaus, jossa esitetään erikseen ajoneuvoon tarvittava laitteisto (IVS) ja hätäkeskuksessa oleva PSAP (Public Safety Answering Point) -laitteisto. Kommunikointi ajoneuvon ja hätäkeskuksen välillä tapahtuu eri puhelinverkkojen välityksellä. Kuvassa PLMN (Public Land Mobile Network) -matkapuhelinverkko ja PSTN (Public Switched Telephone Network) -kiinteä puhelinverkko. (Inside GNSS 2, 2015)



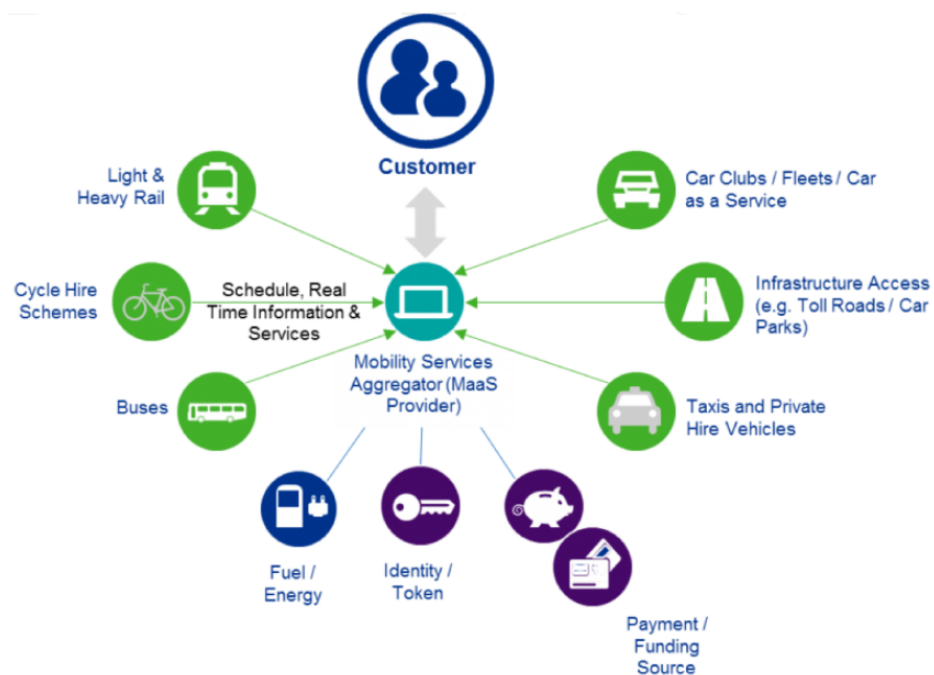
Kuva 15. Koko eCall-järjestelmään kuuluvien kokonaisuuksien arkkitehtuurikuvaus. (Inside GNSS 2, 2015)

Vuonna 2016 yli 25 500 ihmistä kuoli ja 135 000 ihmistä loukkaantui vakavasti tieliikenneonnettomuuksissa EU:n alueella. Näiden johdosta yhteiskunnalle aiheutuu vuosittain 130 miljardin euron taloudellinen taakka. Tämän automaattisen hätäjärjestelmän ansiosta on arvioitu, että pelastus- ja ensiapuhenkilöstön vasteajat nopeutuisivat 40% kaupunkialueilla ja 50% hajaseuduilla. Avun saamisen nopeutuminen vähentäisi liikennekuolemia vähintään 4% ja vakavia loukkaantumisia 6%. Tämä tarkoittaisi, että ihmishenkiä säästyisi ainakin yli 1000 ja vakavien loukkaantumisien määrää voitaisiin vähentää yli 8000. Arvioiden toteutuessa taloudelliset hyödyt olisivat suuria ja arvokkaita ihmishenkiä säästyisi. (GSA4, 2019)

Hälytysjärjestelmän konkreettinen hyöty esiintyy esimerkiksi tilanteissa, joissa onnettomuuteen joutunut ajoneuvo suistuu tieltä paikkaan, johon ohikulkijat eivät näe. Tällaisessa tilanteessa avun saanti viivästyy merkittävästi, mutta eCall-varustettu ajoneuvo kutsuu avun paikalle automaattisesti. Järjestelmän paikannustarkkuus on riittävä opastamaan apu tarkasti paikalle. (Inside GNSS 2, 2015)

4.4 MaaS

Mobility as a Service (MaaS) on ihmisten uudenaikaiseen liikkumiseen suunniteltu konsepti. Liikkumispalvelun toimintaperiaatteena on tarjota erilaisia kulkutapoja kertamaksua tai kiinteitä sopimuksia vastaan riippuen sopimustyyppistä ja palveluntarjoajasta. MaaS:n tarkoituksena on tarjota kulluttajille laaja valikoima erilaisia kulkutapoja kuten yhteiskäyttöisiä autoja, polkupyöriä tai julkisen liikenteen palveluita. Tavoitteena on liikkumisen palveluistuminen ja sen seurauksena yksityisautoilun vähentäminen. Ympäristön näkökulmasta tavoitteena on vähentää liikenteen aiheuttamia päästöjä ja muita haittoja. Kuvassa 16 havainnollistetaan MaaS-palvelun konsepti. (GSA 7, 2019; ks. myös GSA 8, 2019)



Kuva 16. MaaS-palvelun konsepti. (Spark, 2018)

MaaS:n yhtenä tärkeimpänä elementtinä on satelliittipaikannus, jonka avulla käyttäjät saavat sijaintinsa älypuhelimessa käytettävään MaaS-sovellukseen ja voivat hyödyntää palvelun tarjoamia ajoneuvoja. Polkupyörissä, potkulaudoissa, yhteiskäyttöautoissa ja missä tahansa muissa konseptissa hyödynnettävissä kulkuvälineissä on myös oltava GNSS-paikannusratkaisu. Tämä mahdollistaa palvelun käyttäjälle reaaliaikaisen ja optimaalisen reittisuunnittelun tilanteeseen soveltuvalla kulkutavalla. (GSA 7, 2019; ks. myös GSA 8, 2019)

Palvelun suurin käyttö painottuu kaupunkialueille, jossa rakennukset aiheuttavat katvealueita. Tästä syystä paikannuksen tarkkuus heikkenee ja palvelun luotettavuus laskee. Ongelmaksi voi muodostua varsinkin sovelluksen käyttö älypuhelimilla, joissa on vain esimerkiksi GPS- tai GLONASS-tuki. Paikannuksen luotettavuus ja tarkkuus kasvaa, mikäli paikannusta

hyödyntävä laite tukee useita GNSS-järjestelmiä. Palvelun tarjoamissa kulukuvälineissä on myös oltava tähän käyttöön soveltuva GNSS-vastaanotin. (Galileo GNSS, 2018)

4.5 Älypiirturi

Ajopiirturi on pakollinen laite ammattikuljettajilla, jonka avulla seurataan kuljettajien ajoaikoja sekä ajettuja matkoja. Uuden sukupolven älypiirturit tulivat pakollisiksi EU:n alueella kaikissa kuorma- ja linja-autoissa, jotka otetaan käyttöön 15.6.2019 jälkeen. Kyseisessä laitteessa on lukuisia uusia ominaisuuksia, kuten parannetut tietoturvaominaisuudet, mahdollisuus etävalvontaan ajo- ja lepoaikojen osalta sekä GNSS-tuki. Tämän uuden EU-lain voimaantulon taustalla on harmaan talouden torjunta sekä yhteiseurooppalaisten kuljetusmarkkinoiden tasapuolisen kilpailun tukeminen. (Traficom, 2019)

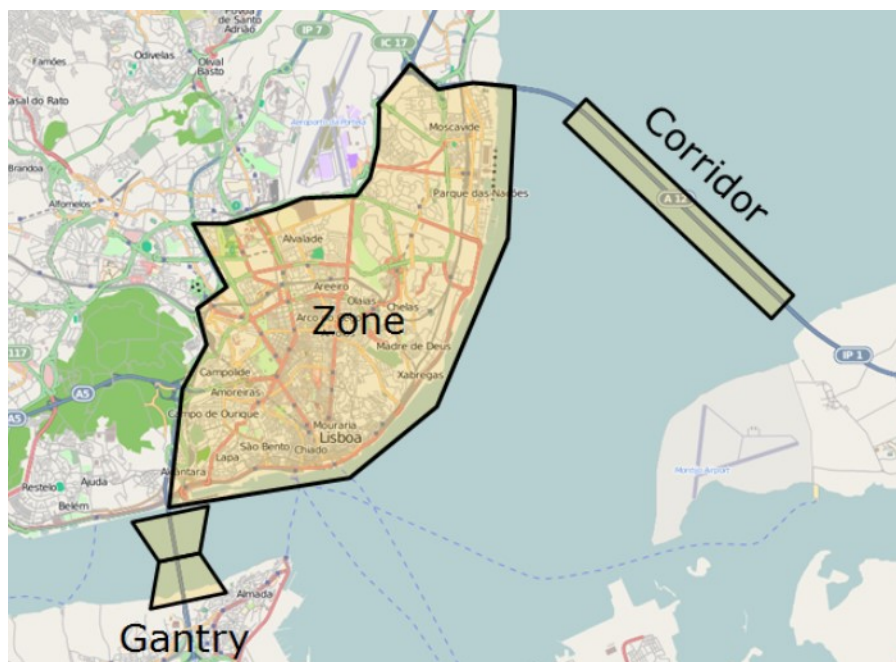
Satelliittipaikannuksen avulla uudet piirturit tallentavat ajon alussa ja lopussa ajoneuvon sijainnin sekä päivittää tietoa kolmen tunnin välein. Käytettävien laitteiden on oltava yhteensopivia Galileon ja EGNOS:n kanssa, mutta myös muita GNSS-järjestelmiä voidaan hyödyntää näiden lisäksi. Uusia älypiirtureita on entistä vaikeampi manipuloida useiden integroitujen järjestelmien takia. Myös ajon aikaisten tietojen lukeminen on helpompaa valvontaa suorittavien tahojen toimesta. Etävalvontajärjestelmän avulla ajoneuvon tietojen tarkastuksen voi suorittaa pysäyttämättä ajoneuvoa, jolloin säästyy aikaa ja resursseja. Järjestelmä ilmoittaa, jos esimerkiksi GNSS-vastaanottimen nopeus- ja matkatiedoissa on suuria eroavaisuuksia kuorma- tai linja-auton omien mittareiden kanssa. (Günter, 2019; ks. myös Scania, 2019)

4.6 Tiemaksut

Euroopan alueella tiemaksuja peritään useissa valtioissa. Tienkäytöstä jouuu maksamaan Saksassa, Norjassa, Tsekissä, Unkarissa, Romaniassa, Slovakiassa, Sloveniassa, Kroatiassa, Puolassa, Portugalissa, Italiassa, Irlannissa, Kreikassa, Latviassa, Itävallassa, Espanjassa, Iso-Britanniassa ja Ranskassa. Tiemaksujärjestelmiä on käytössä myös Kanadan ja Yhdysvaltojen alueilla. Tiemaksujen avulla rahoitetaan uusia tiehankkeita ja ylläpidetään olemassa olevaa tieinfrastruktuuria sekä pyritään vähentämään ruuhkia, hiilidioksidipäästöjä ja melusaastetta. (EU, 2018; ks. myös IMS n.d.)

Nykyisin käytössä on elektronisia järjestelmiä, joista uusimmat hyödyntävät GNSS:ää. Satelliittipaikannuksen ja ajoneuvossa olevan yksikön avulla valvontaa voidaan suorittaa kustannustehokkaasti, koska tämä järjestely vaatii vain vähän erillistä infrastruktuuria. Tällaisessa kehittyneessä ajoneuvoyksikössä on integroitu matkaviestinverkkoja hyödyntävä modeemi, jonka välityksellä dataa välitetään automaattisesti valvontaa suorittavan toimijan järjestelmään. Tienkäytöstä perittävä maksu perustuu GNSS-

pohjaisissa järjestelmissä virtuaalisiin alueisiin, jotka ladataan automaattisesti ajoneuvoyksikköön lähestyttäessä esimerkiksi virtuaalista portaalia. Kuvassa 17 esitetään erilaisia aluetyyppejä, joiden avulla maksut määräytyvät. Perintä voidaan suorittaa alueperusteisesti (Zone), jolloin ajoneuvon käyttäjälle kertyy maksua koko ajan alueen sisällä ollessa. Toinen tapa voi olla portaaliperusteinen (Gantry). Tässä maksutapahtuma aktivoituu, kun ajoneuvo ylittää tietyn linjan samaan tapaan kuin perinteisessä ihmisten kontrolloimassa fyysisessä valvontapisteessä. Lisäksi voidaan käyttää käytäväperusteista (Corridor) tapaa, jossa maksu peritään alueperusteisen mukaisesti. Usein Corridor sijoitetaan kattamaan tiettyjä tieosuuksia. (ESA 6, 2011)



Kuva 17. GNSS-pohjaisissa tiemaksujärjestelmissä käytettäviä virtuaalisia maksualueita. (ESA 6, 2011)

Vuoden 2021 lokakuun jälkeen kaikissa Euroopan markkinoille tulevissa ajoneuvoyksiköissä on oltava Galileo- ja EGNOS-tuki. Näiden ohella voidaan hyödyntää myös muita GNSS-järjestelmiä. Lisäksi automaattisen valvonnan suorittamiseksi on laitteistosta löydyttävä matkaviestinmodeemi tai 5,8 GHz:n mikroaaltotekniikkaa hyödyntävä datayhteys. (EU-direktiivi 2019/520)

4.7 Kalustonhallintajärjestelmät

GNSS-pohjaisia kalustonhallintajärjestelmiä (fleet management) käytetään ajoneuvojen paikantamiseen, jonka ansiosta kuljetusyritykset pystyvät hallitsemaan kustannustehokkaasti operatiivista kokonaisuutta. Tällaisella järjestelmällä voidaan optimoida resurssien käyttöä sekä ajettujen kilometrien, ajoreittien ja polttoaineen kulutusta. Vuonna 2009 GNSS-pohjaisia kalustonhallintajärjestelmän ajoneuvoyksiköitä oli asennettu

kuusi miljoonaa Pohjois-Amerikassa ja Euroopan alueella viisi miljoonaa. (ESA 7, 2011)

Ajoneuvoon sijoitettavia kalustonhallintajärjestelmän laitteita on erilaisia, kuten esimerkiksi passiivisia (Passive Tracking), aktiivisia (Active Tracking) ja reaaliaikaisia (Real-Time). Reaaliaikaiset ajoneuvoyksiköt lähettävät dataa matkaviestinverkkojen tai satelliittien kautta jatkuvasti. Passiivisissa laitteissa tiedot saadaan jälkikäteen manuaalisesti siirtämällä ja aktiivisissa haluttu informaatio lähetetään viiveellä intervallityyppisesti tai määritysten mukaisesti, kun jotkin ennalta asetetut olosuhteet toteutuvat. (ESA 7, 2011)

4.8 Ajoneuvojen vakuutusmaksut

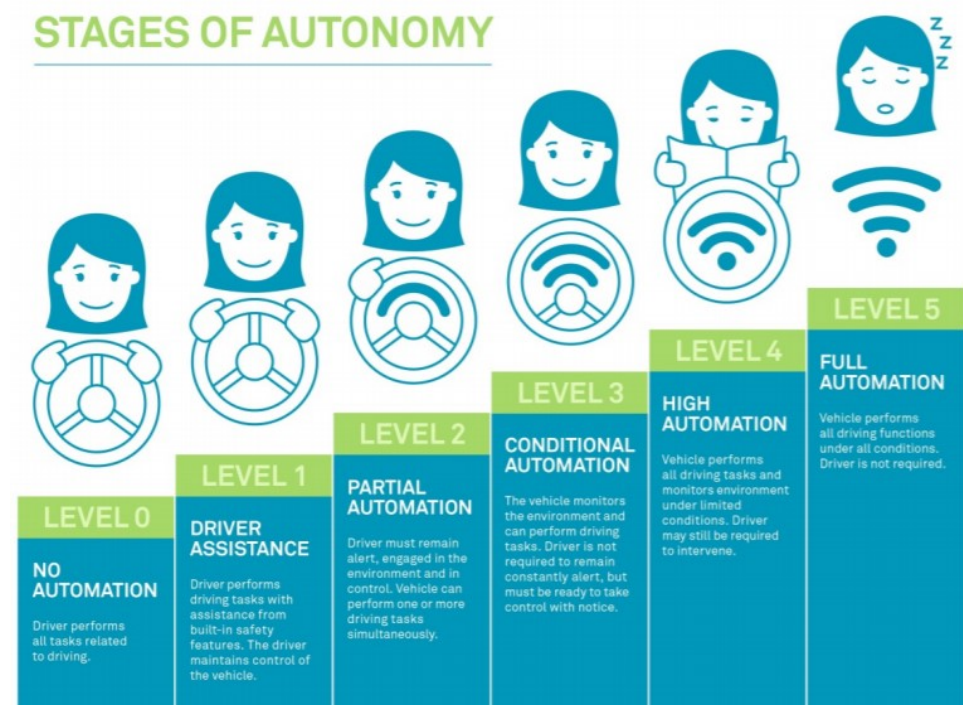
Perinteisen autovakuutuksen rinnalle on suunniteltu uudenlaisia palveluita, kuten GNSS-pohjaisia ajoneuvovakuutuksia. Suomessakin on ollut kokeilussa tämän kaltainen vakuutusvaihtoehto. Maksun suuruus perustuu ajettujen kilometrien määrään, ajoaikaan sekä kuljettajan ajotapaan. Palvelun käyttöönotto vaatii ajoneuvoon asennettavan yksikön, johon on integroitu useita sensoreita, kuten GNSS-vastaanotin. Laite kerää dataa kiihdytyksistä, nopeudesta, jarrutuksista, kaarrostojen jyrkkyydestä, matka-ajasta ja kilometreistä sekä sijainnista. (GSA 6, 2018; ks. myös Punjwani, 2019)

Tämä uudenlainen palvelu voi parantaa liikenneturvallisuutta sekä vähentää liikenteestä aiheutuvia saasteita. Kuljettajat saattavat kiinnittää paremmin huomiota ajotapoihinsa, jolloin liikenteen turvallisuus ja onnettomuuksien määrä sekä vakavuus pienenee. Lisäksi vähentyneet ajosuoritukset voivat johtaa ruuhkattomampaan liikenteeseen ja haitallisten meluhaittojen sekä saasteiden määrän vähentymiseen. (Tselentis, Yannis, Vlahogianni, 2016) Ajotapaan perustuva vakuutus nähdään liikennesektorin näkökulmasta erittäin lupaavana palveluna, sillä vuonna 2018 tähän käyttöön soveltuvia telematiikkalaitteita oli valmistettu jo 10 miljoonaa. (GNSS Market Report, 2019, s. 37)

4.9 Autonomiset ajoneuvot

Autonomisten ajoneuvojen tekniikan kehitys on kokenut viime vuosina suuren harppauksen. Tätä tekniikkaa hyödyntävät ajoneuvot yleistyvät kovaa vauhtia yksityisautoilussa sekä joukkoliikenteessä ja logistiikassa. Autonomisen ajamisen tasoja on viisi, joista esimerkiksi tasolla yksi autossa on kuljettajaa avustavia toimintoja, mutta auto ei kykene itsenäiseen toimintaan. Tason viisi ajoneuvossa ihmiset ovat vain matkustajia ja auto suorittaa ajamisen itsenäisesti. Kuvassa 18 on listattu autonomian kehitystasot. Nykypäivänä suuri osa uusista ajoneuvoista on autonomian tasolla yksi, mutta tason kaksi ajoneuvojakin löytyy paljon. (BMW, 2019; ks. myös MML, n.d.) Tasot 3-5 ovat laajalti vielä testikäytössä, mutta esimerkiksi

Volvo julkisti yhteistyössä Uberin kanssa vuonna 2019 tason 4 henkilöauton, jonka lupaavat olevan kuluttajamarkkinoilla 2021. Volvo odottaa myös, että tämän vuosikymmenen puoleenväliin mennessä kolmannes yrityksen myydyistä autoista olisi täysin autonomisia. (Automotive, 2019)



Kuva 18. Autonomisen ajamisen tasot. (Inside GNSS 3, 2018)

Satelliittipaikannus on autonomisen ajamisen tärkeimpiä elementtejä, mutta sensorifuusio on ehdoton edellytys turvalliselle ja toimintavarmalle ajamiselle. Näiden ajoneuvojen itsenäisessä ajamisessa hyödynnetään useiden sensoreiden informaatiota. Dataa kerätään esimerkiksi tutkista, kameroista, inertiajärjestelmästä ja GNSS-vastaanotimesta. (Road User Report, 2019, s. 9-11) Lisäksi tarkat karttaohjelmistot ovat ehdoton edellytys riittävän luotettavalle autonomiselle ajamiselle. Näitä karttoja kutsutaan HD-kartoiksi (High Definition Maps) ja ne ovat erityisesti älyliikenteen sovelluksille suunniteltuja. HD-kartat tarjoavat senttimetritarkkaa sijaintitietoa sensoreiden avulla. (Vardhan, 2017) Autonomisten ajoneuvojen GNSS-paikannuksessa hyödynnetään tällä hetkellä laajasti RTK-palvelua, jolloin käytössä on oltava myös riittävän toimintavarma ja viiveetön data-yhteys korjaustietojen vastaanottamiseen (Kutilla, 2020; Maanpää, 2020; Nissin, 2020; Virtanen, 2020). Toisaalta satelliittipaikannuksen tärkeys ja vaatimukset sekä lopullisen sensorikokoonpanon valinta ovat osittain vielä avoimia tutkimuskysymyksiä alan edelleen kehittyessä (Maanpää, 2020).

Satelliittipaikannuksen osalta autonomisten ajoneuvojen tulee hyödyntää monitaajuusvastaanottimia kaikkien GNSS-järjestelmien tuella, jotta paikannus on luotettavaa ja tarkkaa kaikissa olosuhteissa. Lisäksi vastaanottimessa on oltava havaintokyky GNSS-häiriöiden varalta ja kestävyys signaalin väärentämiselle. Mahdollisissa paikannuksen manipulointitapauksissa

laitteiston on ilmoitettava kuljettajalle tai ajoneuvossa matkustavalle virheestä. Kuvassa 19 esitetään vaatimuksia autonomisten ajoneuvojen sekä muiden liikenteen sovellusten paikannukselle. Kuvan ensimmäiseen riviin kuuluu sovellukset, jotka ilmoittavat esimerkiksi tietöistä tai muista liikennettä haittaavista muutoksista. Toinen rivi tarkoittaa autonomisen ajoneuvojen vaatimuksia. Kolmas rivi liittyy maksupalveluihin kuten tiemaksuihin ja vakuutuksiin. Neljännellä rivillä tarkoitetaan esimerkiksi eCall:ia ja älypiirtureita. Viimeisenä kuvataan vaatimuksia muille sovelluksille, joita ovat esimerkiksi kalustonhallintajärjestelmät, navigointi ja MaaS-palvelut. (Road User Report, 2019, s. 9-10)

	Availability	Positioning accuracy	Timing accuracy	Integrity message	Robustness vs. spoofing	Detection of GNSS interferences	
Safety critical - traffic and safety warning	> 99.5%	< 3 metres (horizontal, Day 1 applications) < 1 metre (horizontal, advanced applications)	< 1 second	Required	Robustness vs. spoofing threats required	Required	2019 update
Safety critical - automated driving	> 99.9%	< 20 cm (horizontal) < 2 metres (vertical)	< 1 micro second	Required	Robustness vs. spoofing threats and notification to the driver required	Required	
Payment critical	> 99.5%	< 3 metres (horizontal)	< 1 second	Required	Authentication message required	Required	
Regulatory critical	> 99.5%	< 5 metres (horizontal)	< 1 second	Required	Authentication message required	Required	
Smart mobility	> 99.5%	< 5 metres (horizontal) < 3 metres (horizontal) if payment functions are included	< 1 second	Not required	Authentication message required	Required	2019 update

Kuva 19. Vaatimuksia satelliittipaikannuksen ominaisuuksille liikenteen sovelluksissa. (Road User Report, 2019, s. 10)

Autonomiset ajoneuvot liittyvät vahvasti älyliikenteeseen ja molemmat kulkevat kehityksessä rinnakkain. Tulevaisuudessa ajoneuvojen ja liikenteen infrastruktuurin suunnitellaan olevan vahvasti yhteydessä toisiinsa, jolloin ajoneuvojen sensoreiden ja muiden liikenteen järjestelmien data on kaikkien liikenteessä kulkevien hyödynnettävissä. Tätä kutsutaan termillä V2X (Vehicle-to-Everything). Satelliittipaikannus ja muut paikannusratkaisut ovat tämänkin toimintamallin keskiössä. Älyliikenteen ja autonomisten ajoneuvojen odotetaan vähentävän liikenneonnettomuuksia ja ruuhkia sujuvoittamalla liikennettä. Lisäksi liikenteen aiheuttamien ympäristöhaittojen uskotaan vähenevän. (NXP, n.d.)

5 SATELLIITTIPAIKANNUKSEN HÄIRIÖT JA VIRHELÄHTEET

Satelliittien lähettämä signaali on maahan saapuessaan erittäin heikkotehoinen ja tästä johtuen se on haavoittuvainen monille ilmiöille. Häiriöitä voi aiheutua tahattomasti tai tahallisesti. Tahattomia ilmiöitä voidaan kutsua häiriöiksi ja tahallisia häirinnäksi. Lisäksi paikannukseen vaikuttaa monet virhelähteet. Näiden ilmiöiden vaikutuksesta satelliittipaikannusjärjestelmien tuottama PNT-palvelu voi keskeytyä kokonaan tai häiriintyä niin, että esimerkiksi paikanmääritys on virheellinen. Tässä kappaleessa kuvataan merkittävimmät tahattomat häiriölähteet, virhelähteet sekä tahalliset häirintämenetelmät. Viimeisessä alakappaleessa selvitetään olemassa olevia ratkaisuja häiriöiden ja häirinnän estämiseksi.

5.1 Tahattomat häiriöt ja virhelähteet

Virhelähteisiin kuuluvat luonnonilmiöt ja tahattomiin häiriöihin ihmisten tai laitteiden aiheuttamat häiriöt. Luonnonilmiöistä merkittävin satelliittipaikannuksen virheen aiheuttaja on ilmakehä. Ilmakehän aktiivisuus ja muutokset aiheuttavat sen läpi kulkevaan signaaliin suunnan ja nopeuden muutoksia. Muutokset signaalissa voivat johtaa vastaanottimessa epätarkkaan paikannukseen. Tähän ilmiöön on olemassa onneksi laskennallisia ratkaisuja ja korjaustiedon välityspalveluita. Tästä huolimatta häiriö on silti aina olemassa. (Kuusniemi, 2012)

Toinen luonnosta tai rakennuksista johtuva virheellisen paikannuksen aiheuttaja voi olla monitieheijastuminen. Tässä ilmiössä signaali kimpoaa rakennuksista tai maastosta ja saapuu myöhemmin vastaanottimeen kuin suoraan satelliitista saapuva signaali aiheuttaen virheitä paikkaratkaisuun. Tähänkin ilmiöön on kehitetty teknisiä ratkaisuja virheiden minimoiseksi vastaanottimissa ja antenneissa. (PennState, n.d.)

Paikannukseen voi aiheutua häiriöitä ja epätarkkuutta myös inhimillisten virheiden takia, kuten esimerkiksi taajuuksien väärinkäytöstä tai viallisen laitteen käytöstä. Satelliittipaikannukseen käytettävät taajuudet ovat osittain ainoastaan kyseistä käyttöä varten varattuja. Samoilla taajuusalueilla on myös muuta luvallista radioliikennettä, mutta luvaton liikennöinti on kiellettyä. Mikäli näillä taajuusalueilla on luvatonta sinne kuulumatonta radioliikennettä, niin se voi pahimmillaan estää paikannussignaalien vastaanoton.

Vialliset laitteet voivat olla yhtenä syynä häiriöiden syntyyn. Jokin vioittunut sähkölaite tai esimerkiksi vioittunut langaton järjestelmä saattaa lähettää radiotaajuista säteilyä väärällä taajuudella aiheuttaen häiriötä satelliittipaikannukseen. Toisaalta myös täysin toimivat laitteet tai järjestelmät, jotka lähettävät radiotaajuista säteilyä viereisillä taajuusalueilla voivat aiheuttaa häiriöitä paikannukseen vastaanottimen yliohtautuessa. Tämä ongelma on minimoitavissa kunnollisilla ja laadukkailla vastaanottolaitteilla

sekä ohjelmallisilla ratkaisuilla. Antennivalinta onkin erittäin kriittinen suunniteltaessa GNSS-signaalien vastaanottoa. Laadukkaissa antenneissa on kunnolliset suotimet, jotka eivät päästä viereisiltä taajuusalueilta ei haluttuja signaaleja vastaanottimeen. Tästä huolimatta vastaanottoa saattaa häiritä harmoniset taajuudet ja keskeismodulaatio. (NovAtel 2, 2017)

5.2 Tahalliset häirintämenetelmät

Tahallisella häirinnällä tarkoitetaan menetelmää, jolla GNSS-signaalien vastaanottoa häiritään tarkoituksella tähän suunnitellulla laitteella. Häirintä voi olla kokonaan GNSS-signaalien vastaanoton estämistä tai huijaamista, niin että vastaanotin saa virheellisen paikka- tai aikatiedon. Häirintää voi suorittaa yksittäinen henkilö tai suurempi toimija, kuten jonkin valtion asevoimat. Tässä alakappaleessa kuvataan kaksi erilaista menetelmää, joilla häirintää voidaan suorittaa.

5.2.1 Jamming

Jamming eli häirintä tarkoittaa GNSS-vastaanoton estämistä kokonaan, joko yhdellä tai useammalla taajuusalueella. Tämä tapahtuu niin, että häirintään suunniteltu laite lähettää radiotaajuista signaalia teholla, joka ylittää satelliitista vastaanotettavan signaalin tehon. Kun GNSS-vastaanotin havaitsee tämän tehokkaamman häirintäsignaalin, se ei enää kykene erottelemaan oikeaa paikannussignaalia kohinan seasta eikä tuota enää PNT:tä.

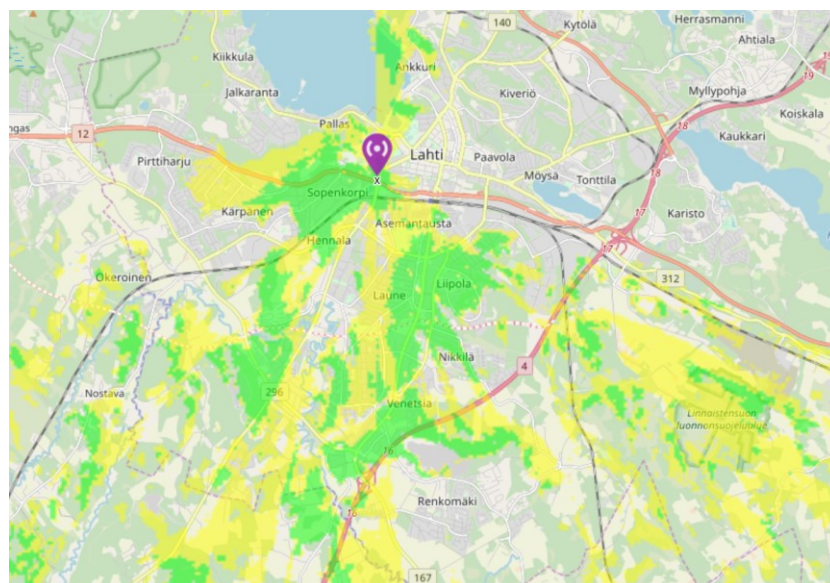
Yleisimpiä häirintälaitteita ovat niin kutsutut Personal Privacy Device (PPD) laitteet. Näitä laitteita pystyy ostamaan kuka tahansa verkkokaupoista esimerkiksi Kiinasta. PPD:tä käyttävät usein kuorma-autonkuljettajat peittääkseen oman sijainnin GNSS-pohjaisten tietullien takia tai muista syistä. PPD-laitteet voivat olla käytössä myös varastetuissa autoissa tai ajoneuvossa, joka on mukana laittomassa toiminnassa. Jotkut saattavat myös haluta peittää oman sijaintinsa siinä pelossa, että heidän sijaintiaan tarkkailaan. (Inside GNSS 1, 2012)

Pienestä lähetystehostaan huolimatta PPD-laitteet voivat aiheuttaa jopa hengenvaarallisia tilanteita, jos laite on esimerkiksi lentokentän lähellä ja häiritsee lentoliikenteen navigointia. Pienitehoisenkin häirintälaitteen kantama saattaa olla jopa useita satoja metrejä. Tyypillisesti PPD-laitteiden lähetysteho on paljon alle 1W, mutta internetistä on helposti saatavilla häirintälaitteita, joiden lähetysteho on muutamista wateista kymmeniin wateihin. Käytännössä mitä suurempi lähetysteho laitteessa on, sitä suuremmalta alueelta se häiritsee GNSS-signaalien vastaanottoa. Kuvassa 20 on pienitehoinen PPD-laite ja suuritehoisempi kannettava häirintälaite.



Kuva 20. Vasemmalla tyypillinen autossa käytettävä pienitehoinen häirintäläite. Oikealla suurempitehoinen kannettava häirintäläite. (Septentrio, n.d.)

Mikäli häirintään käytettäisiin suuritehoista lähetintä, voisi sen vaikutukset olla väärässä paikassa erittäin vakavat. Kuvassa 21 on simuloitu tilannetta, jossa käytössä on häirintäläite, jonka lähetysteho on 60W. Tässä kuvitteellisessa tilanteessa häirintäläite on sijoitettu Lahteen Helsingintien ja valtatie 12 risteykseen, joka on ympäristöön verrattuna korkea maastonkohta. Tältä paikalta häirintä ulottuisi helposti kilometrien päähän valtatie 4:lle asti ja peittäen pitkän kaistaleen valtatie 12:sta. Otollisissa maastonkohdissa häirintä kantaa lähes 20 kilometrin päähän. Kuvassa vihreä väri tarkoittaa alueita, joissa GNSS-signaalia ei kyetä vastaanottamaan ollenkaan ja keltainen väri tarkoittaa alueita, joissa signaalin vastaanotto on heikkoa. Heikoillakin alueilla paikannukseen aiheutuu epätarkkuutta ja epäluotettavuutta. Näillä alueilla paikannuksen hyödyntäminen tarkkuutta vaativiin käyttökohteisiin kuten autonomisen ajoneuvon paikannukseen ei todennäköisesti onnistuisi.



Kuva 21. 60W häirintälaitteen peittoalue. (Radio Mobile, 2019)

Peittoalueen simulointi on tehty selainpohjaisella julkisella sovelluksella (Radio Mobile), joka on tarkoitettu radioamatöörien työkaluksi. Ohjelma huomioi maaston korkeuserot ja radioaaltojen etenemismallin. Ohjelmaan asetetaan arvot lähettimen tehosta ja vastaanottimen herkkyydestä. Tässä vastaanottimen arvona on käytetty tyypillistä GNSS-vastaanottimen herkkyyttä. Simulointi tuottaa hyvän suuntaa antavan kuvan peittoalueen laajuudesta.

Edellä kuvattu tilanne voisi olla täysin todellinen ja toteutettavissa lähes kenen tahansa toimesta, sillä suuritehoisen häirintälähettimen pystyy myös ostamaan internetistä. Kuvassa 22 on 60W häirintälaite. Tilanne muuttuisi oleellisesti vakavammaksi, mikäli tällainen laite sijoitettaisiin korkeammalle esimerkiksi rakennuksen päälle tai mastoon.



Kuva 22. 60W häirintälaite. (Jammer, 2017)

5.2.2 Spoofing

Spoofing tarkoittaa nimensä mukaisesti huijaamista tai väärentämistä. Väärentämisessä on tarkoitus muuntaa käyttäjän saama sijainti- tai aika-ratkaisu, eli esimerkiksi saada jokin vastaanotin näyttämään sijaintia jonkin muualla missä se on todellisuudessa. Väärentäminenkin onnistuu helpoimmillaan melko yksinkertaisilla ratkaisuilla, kuten häirintäkin. Käytännössä tämänkin pystyisi moni suorittamaan internetistä ostetuilla laitteilla. Esimerkiksi halpa ohjelmistoradio mahdollistaa älypuhelimien sijaintitiedon väärentämisen. Tästä yksinkertaisena esimerkkinä toimii joidenkin Pokemon GO-pelin pelaajien käyttämä väärentäminen, jolla he pystyvät manipuloimaan pelissä hyödynnettävää sijaintia pelissä etenemiseen. (Septentrio2, n.d.)

Maailmalla on useita havaittuja väärennystapauksia, joissa toimijan on epäilty olevan valtiollinen eli tässä tapauksessa jonkin valtion asevoimat. Tällainen tekniikka olisi hyödyllinen esimerkiksi taistelutilanteessa, jolloin vastustajan GNSS-järjestelmiin pohjautuvien itsestään liikkuvien alusten

tai muiden välineiden ohjaaminen haluttuun paikkaan voisi olla periaatteessa mahdollista. (Septentrio2, n.d.) Aivan samaan tapaan siviilien käyttämien laitteiden esimerkiksi tulevaisuudessa autonomisten ajoneuvojen sijaintitiedon väärentäminen on mahdollista ja se voisi aiheuttaa merkittäviä vaaratilanteita.

Spoofingia kutsutaan myös älykkääksi häirinnäksi. Satelliitin signaalia voimakkaamman signaalin lähettämisen lisäksi väärennetty signaali sisältää aika- ja paikkadataa, toisin kuin tavallinen häirintä. Väärentäminen voidaan jakaa kahteen eri tyyppiseen toteutustapaan. Satelliittien lähettämää oikeaa signaalia voidaan tallentaa ja lähettää väärennysmielessä jossain toisessa sijainnissa. Tätä tapaa kutsutaan nimellä meaconing. Toinen tapa on generoida ja lähettää oikeita signaaleja muistuttavia signaaleja. (Septentrio2, n.d.)

5.3 Häiriöiden vastatoimet

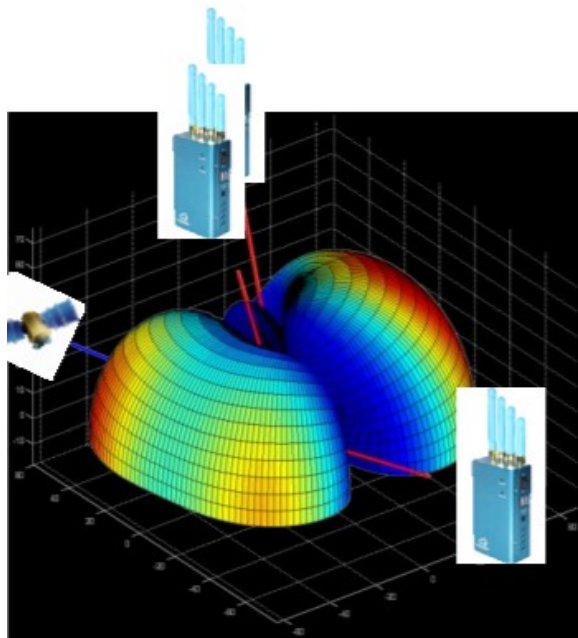
Nykypäivän liikenne ja erityisesti tulevaisuuden älyliikenne pohjautuu vahvasti GNSS-järjestelmiin ja niiden tuottamaan PNT:hen. Tarkka aika, navigointi ja paikannus ovat kriittisiä toimintoja varsinkin älyliikenteen näkökulmasta. Satelliittipaikannus on herkkä monille häiriöille ja sen myötä liikenteen GNSS:ää hyödyntävät sovellukset ja liikenneturvallisuus ovat vaarassa. Teknologiamarkkinoilla on saatavilla paljon erilaisia ratkaisuja häiriöiden estämiseksi ja tunnistamiseksi, joista liikennesegmenttikin voisi hyötyä. Useilla valmistajilla on nykypäivänä myös liikenteen sovelluksiin suunniteltuja tekniikoita tähän tarkoitukseen. (Orolia, 2019) Lisäksi yksittäinen käyttäjä voi suojautua häiriöiltä sekä parantaa häiriönsietokykyä monilla toimenpiteillä ja valinnoilla. Vastatoimia satelliittipaikannuksen häiriötilanteisiin ovat esimerkiksi signaalien todennus- ja salaamisen menetelmät, antenni- ja vastaanotinvalinnat, huolellinen suunnittelu ja laadukkaiden laitteiden hyödyntäminen sekä GNSS-laitteiston integroiminen inertia-suunnistusjärjestelmiin (INS). (Kuusniemi, 2012)

Signaalien salaus on merkittävässä roolissa väärentämisen havaitsemiseksi ja sen vaikutusten estämiseksi. Tätä hyödynnetään kaikissa GNSS-järjestelmien viranomais-signaaleissa. Väärentämistarkoituksessa generoitu signaali ei sisällä tarvittavaa koodia, joten saapuessaan salausta hyödyntävään vastaanottimeen sen huomataan olevan väärennetty eikä saadun datan perusteella tuoteta PNT:tä. Lisäksi häiriönsietokyky on parantunut nykyaikaisten GNSS-satelliittien tuottaman paikannuksen myötä. Uudet signaalit mahdollistavat toiminnan häiriö- tai häirintätilanteessa, jossa signaali-kohinasuhde laskee. (Kuusniemi, 2012)

GNSS-markkinoilla on lukuisia häiriöiden ja häirinnän vastatoimiin suunniteltuja vastaanottimia ja antennoja. Näiden häirinnänestokyvystä käytetään englanninkielisissä lähteissä termiä Anti-Jam (AJ). Tähän tarkoituk-

seen valmistetut laitteet olivat pitkään vain eri maiden asevoimien saatavilla, mutta nykypäivänä AJ:n hyödyt ja tarve on tunnistettu myös siviilikäytössä. Yksi merkittävä käyttökohde on liikenteen eri sovellukset.

Tämän myötä häirinnäntekniikkaa hyödyntävien vastaanottimien ja antennien käyttö sekä saatavuus on kasvanut. Kyseisten laitteiden on tarkoitus varmistaa PNT:n käytettävyys häiriöiden ja häirinnän vaikutuksessa. AJ-ominaisuuksilla varustetut vastaanottimet poistavat laitetasolla niiden havaitsemat häiriöt ja hyödyntävät vain saatavilla olevia oikeita satelliittisignaaleja. Lisäksi saatavilla on AJ-tekniikkaa hyödyntäviä antennoja, joista yleisimpiä ovat CRPA (Controlled Reception Pattern Antenna) -antennit. Tällainen antenni koostuu useasta antennielementistä ja sen toiminta perustuu häiriön tai häirinnän tulosuunnan tunnistamiseen. Häiriön suuntaan muodostetaan nollakohta, joka ei ota vastaan häiriösignaaleja, mutta hyödyntää muista suunnista tulevia oikeita satelliittien lähettämiä signaaleja. (Jones 1, 2017) Kuvassa 23 esitetään CRPA:n toimintaperiaate havainnollisena säteilykuviona.



Kuva 23. CRPA:n säteilykuvio, johon vaikuttaa kolme häirintälaitetta. Säteilykuvio muuttuu häiriöiden suuntaan tekemällä nollakohdat. (Jones 2, 2017)

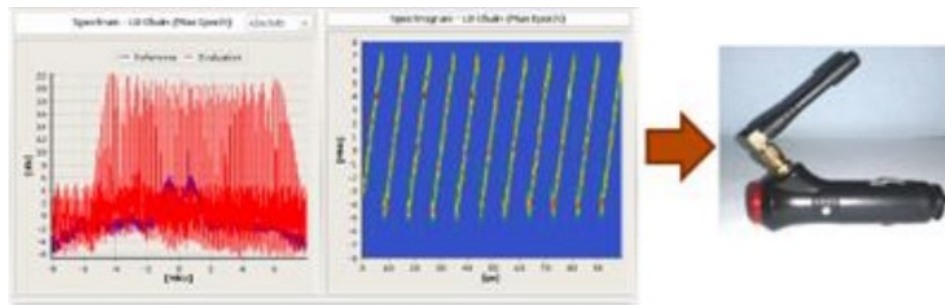
Antenni- ja vastaanotinvalinnoilla voidaan vaikuttaa vastaanoton häiriötömyyteen sekä tarkkuuteen. Suunniteltaessa GNSS-pohjaista sovellusta tulee ottaa huomioon kunkin käyttötarkoituksen vaatimukset. Esimerkiksi autonomisessa ajoneuvossa hyödynnettävän GNSS-laitteiston tekniset ominaisuudet ovat huomattavasti laajemmat kuin älypuhelimessa, jonka paikannustarkkuus riittää käytännössä vain tavalliseen navigointiin. Usein myös tällaisen laadukkaamman vastaanottimen häiriönsieto on huomattavasti parempi. Laitteiston taajuusominaisuudet ovatkin tärkeitä häiriönsiedon kannalta, sillä monitaajuus- ja monijärjestelmätuki ovat hyödyksi häiriötilanteissa. Esimerkiksi L1-kaistan häiriintyessä useampaa taajuutta sekä järjestelmää hyödyntävä vastaanotin tuottaa edelleen PNT:tä

muiden satelliittisignaalien avulla. Lisäksi monitaajuusvastaanottimet tuottavat luotettavamman paikannuksen, koska se on tehokas tapa minimoida ilmakehästä johtuvaa mittausvirhettä. Antennityypilläkin on vaikutusta häiriöttömään paikannukseen, sillä laadukkaissa GNSS-anteissa hyödynnetään suotimia. Näiden avulla ylimääräiset taajuudet suodatetaan pois, jolloin vastaanotetaan ainoastaan GNSS-taajuusalueiden signaaleja. (NovAtel 1, 2015, s. 50 - 51)

Liikenteen kannalta ja varsinkin GNSS-pohjaisten älyliikenteen sovellusten näkökulmasta erilaisten sensoreiden integroiminen yhdeksi kokonaisuudeksi on avainasemassa häiriönsietokyvyn parantamisessa. Esimerkiksi satelliittipaikannuksen ja inertiasuunnistusjärjestelmän (GNSS+INS) yhdistäminen parantaa autonomisen ajoneuvon navigoinnin luotettavuutta häiriötilanteissa. Kyseinen järjestelmäkokonaisuus kykenee tuottamaan sijaintitietoa IMU:n (Inertial Measurement Unit) avulla, vaikka GNSS-vastaanotossa olisi häiriöitä. Autonomisissa ajoneuvoissa käytetään GNSS+INS-järjestelmän lisäksi monia muitakin sensoreita, jotka tekevät paikannuksesta entisestään häiriönsietokykyisemmän. (NovAtel 1, 2015, s. 62 - 64)

Eri valtioiden viranomaisilla on tärkeä rooli häiriötilanteiden tunnistamisessa ja hallinnassa. Tätäkin toimintaa voidaan pitää eräänlaisena vastatoimena häiriötilanteita varten. Ennaltaehkäisevänä toimenpiteenä taajuuksia valvovat viranomaiset vastaavat myös taajuuksien käytön suunnittelusta, mikä osaltaan kieltää esimerkiksi satelliittipaikannukselle varattujen taajuuskaistojen luvattoman käytön. Suomessa tästä toiminnasta vastaa Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Viraston tehtävänä on suunnitella ja valvoa taajuuksien käyttöä sekä selvittää radiohäiriötilanteita. Taajuuksien aktiivisen monitoroinnin merkitys kasvaa tulevaisuudessa älyliikenteen kehittyessä sekä autonomisten ajoneuvojen ja muiden turvallisuuskriittisten palveluiden yleistyessä. Erityisesti huomiota tulisi kiinnittää GNSS-taajuuksien monitorointiin. (User technology report, 2018; ks. myös Traficom 2, 2019)

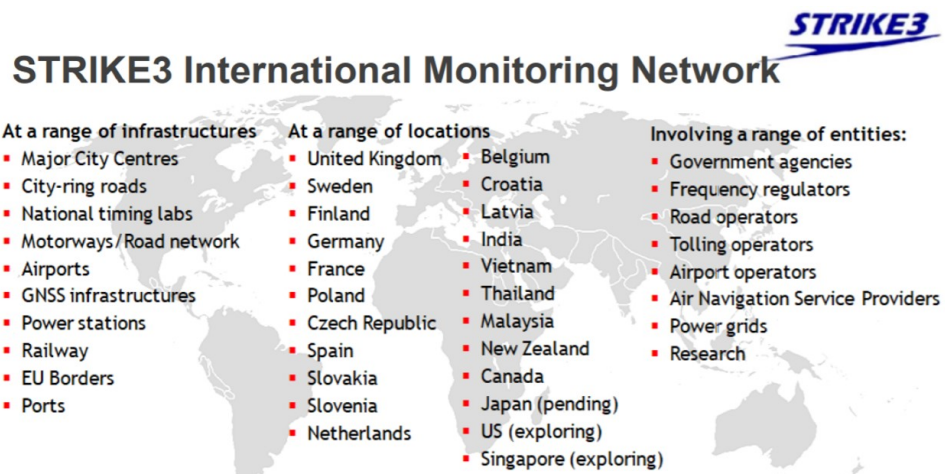
AJ-ominaisuuksilla varustetut antennit ja vastaanottimet poistavat häiriöitä paikallisesti vain kyseisestä laitteesta, mutta häiriöiden tunnistaminen ulkopuolelta on myös tärkeä vastatoimi. Tämä mahdollistaa häiriölähteen paikallistamisen ja poistamisen. Erityisesti valvontaa suorittavilla viranomaisilla on tähän suunniteltuja laitteita. GNSS-taajuuksia häiritsevän signaalin havaitsemiseen voidaan käyttää useita menetelmiä, mutta yksinkertaisimmillaan se onnistuu vastaanottimella, joka on viritetty häiriintyvälle taajuudelle. Vastaanottimesta tarkkaillaan spektri-näkymää, jossa häirintä ilmenee energiatason nousuna. Havaitsemiseen voidaan käyttää suuntaavaa tai ympärisäteilevää antennia. Tarkka paikantaminen suoritetaan suunta-antennilla. (Lehtonen, Virtanen & Askola 2016, s. 22.) Kuvassa 24 näkyy tyypillinen PPD-häirintälaitteen aiheuttama poikkeama spektrissä ja spektrogrammissa, joista häirintä on tunnistettavissa.



8Mhz bandwidth, drifting centre

Kuva 24. PPD-häirintälaitteen aiheuttama spektrin muutos ja spektrogrammikuva. (Dumville, 2018)

Tulevaisuuden GNSS-häiriöiden aiheuttamiin uhkiin varautumiseen on panostettu esimerkiksi projektissa nimeltä STRIKE3 (Standardization of GNSS Threat reporting and Receiver testing through International Knowledge Exchange, Experimentation and Exploitation), joka oli eurooppalainen kolme vuotta kestänyt hanke. Se alkoi vuonna 2016 ja päättyi 2019. Hanke oli Euroopan GNSS-viraston rahoittama ja siinä oli osallisina useita satelliittipai-kannusalan asiantuntijaorganisaatioita, jotka muodostivat projektin konsortion. STRIKE3:n tarkoituksena oli kehittää GNSS-häiriöiden tunnistus- ja monitorointikykyä sekä luoda kansainvälisiä standardeja häiriöraportointiin ja vastaanotintestaukseen. Hankkeeseen osallistui 23 valtiota ympäri maailmaa, mukaan lukien Suomi. Osallistujamaiden toimijoita olivat viran-omaiset, lentokenttäoperaattorit ja monet muut. (GSA 9, n.d.) Kuvassa 25 esitetään osallistujamaat, monitorointiasemien tyypit ja eri toimijat.



Kuva 25. STRIKE3-hankkeen monitorointiasemien sijaintityypit, osallistujamaat ja toimijat. (Dumville, 2018)

6 SATELLIITTIPAIKANNUKSEN HÄIRIÖIDEN VAIKUTUKSET

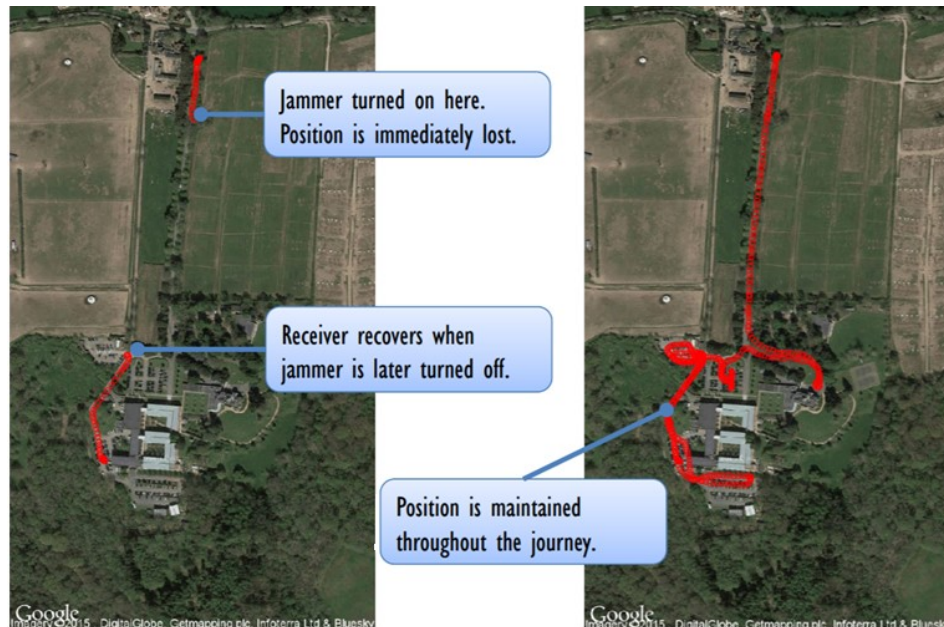
Pahimmillaan satelliittipaikannuksen häiriöt voivat aiheuttaa vakavia seurauksia liikenneturvallisuuteen tai vaikeuttaa pelastustoimintaa. Satelliittipaikannusta hyödyntävät tieliikenteen sovellukset ovat yhtä alttiita häiriöille kuin muutkin GNSS-pohjaiset eri alojen toiminnot. Tässä kappaleessa kuvataan GNSS-häiriöiden vaikutuksia tieliikenteen sovelluksiin ja niiden toimintaan. Vakavissa häiriötilanteissa autonomisten ajoneuvojen vikatilanteet johtaisivat todennäköisesti merkittävimpiin turvallisuusriskeihin. Muiden sovellusten osalta seuraisi vähäistä haittaa eivätkä ne todennäköisesti aiheuttaisi vakavia vaaratilanteita. Kappale on jaoteltu kahteen alakappaleeseen, joista ensimmäisessä käsitellään vaikutuksia autonomisiin ajoneuvoihin ja toisessa vaikutuksia kaikkiin muihin työssä käsiteltyihin sovelluksiin.

6.1 Vaikutukset autonomisiin ajoneuvoihin

GNSS-paikannus on yksi tärkeimmistä autonomisten ajoneuvojen paikannustekniikoista. Ilman satelliittien tuottamaa PNT:tä autonominen ajoneuvo ei todennäköisesti kykenisi ajamaan pitkiä matkoja tämän hetkisillä sensoriratkaisuilla. Ajamisen tarkkuuteen vaikuttaa käytetyt sensorit ja autonomisen ajoneuvon tekniikan kehityksen taso. Teoriassa ilman GNSS-pohjaista paikannusta autonominen ajaminen olisi mahdollista, mutta todennäköisesti jossain vaiheessa ajon aikana ilmenisi ongelmia inertiajärjestelmässä syntyvän vääristymän takia tai muiden sensoreiden mahdollisesta epätarkkuudesta esimerkiksi ympäristön olosuhteiden vuoksi. (Kuttila, 2020; Nissin, 2020; Virtanen, 2020) Joissain tapauksissa tietyt autonomiset ajoneuvot pysähtyvät automaattisesti menettäessään GNSS-pohjaisen paikkaratkaisun (Nissin, 2020). Edellä kuvatut asiat pohjautuvat tämän opinnäytetyön tueksi tehdyn asiantuntijakyselyn tietoihin, mutta ajoneuvojen tarkempaan toiminnan tarkasteluun satelliittipaikannuksen puuttuessa tarvittaisiin käytännön testejä. Myös tarkat häirinnän ja häiriöiden muut vaikutukset vaatisivat konkreettista testaustoimintaa.

GNSS-vastaanoton estävää häirintää tai häiriöitä ei pidetä niin vakavana liikenneturvallisuuden vaarantumisen kannalta kuin signaalin väärentämistä (Kuttila, 2020; Marila, 2020). Häirintä on helpommin havaittavissa, koska se estää palvelun käytön kokonaan tai heikentää paikannusta huomattavasti. Tästä johtuen sen aiheuttamiin vaikutuksiin on helpompi puuttua. Kuvassa 26 näkyy häirinnän vaikutus autossa olevaan GNSS-vastaanottoon. Testi on suoritettu luvallisesti Iso-Britanniassa teknologia-alalla toimivan yrityksen toimesta. Kokeessa testattiin myös AJ-yksiköllä varustettua vastaanotinta. Kyseisen testin perusteella PNT-palvelu katkeaa välittömästi häirinnän käynnistyttyä, mutta häirinnän vaikutus on estettävissä vastatoimilla. (Jones 2, 2017) Suomessa oli vuonna 2018 epäily GPS-häirinnästä, jonka uskottiin johtuneen Venäjällä samaan

aikaan olleesta sotaharjoituksesta. Häirintä häytti Lapissa käynnissä olleen autonomisten ajoneuvojen testaustoimintaa. Epäilyllä GPS-häirinnällä oli vaikutuksia myös lentoliikenteen toimintaan. (Kutilla, 2020; Nissin, 2020; ks. myös C4ADS, s. 14 2019) Vastaavanlainen suuritehoinen ja laajamittainen häirintä voisi aiheuttaa tulevaisuudessa vakavia seurauksia liikenneturvallisuuden näkökulmasta.



Kuva 26. Häirintälaitteen vaikutus ajoneuvossa olevan vastaanottimen paikkaratkaisuun. Vasemmalla tavallinen GNSS-vastaanotin ja oikealla sama tilanne, mutta laitteistoon on lisätty erillinen AJ-laite. Häirinnän alla paikkaratkaisu menetetään välittömästi. Testissä käytetyllä häiriönesto-laitteella paikannus ei katkea. (Jones 2, 2017)

Satelliittipaikannuksen puuttuessa joissakin tapauksissa autonominen ajoneuvo pysähtyy (Nissin, 2020). Mikäli ajon lopettaminen kyetään toteuttamaan turvallisesti, niin se ei todennäköisesti aiheuttaisi vakavia vaaratilanteita. Tässä riskinä on kuitenkin peräänajo, mikäli pysähtyminen toteutuisi yllättäen ja siitä voisi seurata vakaviakin seurauksia. Signaalin väärentämistapauksessa puolestaan vastaanotin tuottaa koko ajan PNT-palvelua vastaanotettujen väärin signaalien perusteella, jolloin palvelu tulkitaan edelleen toimivaksi. Tästä johtuen signaalin väärentäminen voisi johtaa vakaviin liikenneturvallisuuspoikkeamiin. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että ajoneuvo voisi ajaa pakotetusti esimerkiksi jalkakäytävällä tai vastaan tulevien autojen kaistalla. (Kutilla, 2020; Nissin, 2020) Tällaiset tilanteet ovat todennäköisesti erittäin epätodennäköisiä, koska laajamittainen häirintä ja signaalien väärentäminen vaatisi kehittyneitä ja kalliita laitteita sekä laajaa osaamista. Lisäksi tilanne vaatisi myös sen, että muutkaan sensorit eivät toimisi normaalisti (Nissin, 2020).

Lievänä uhkana pidetään kuitenkin pienitehoisia PPD-häirintälaitteita, mutta niiden todellista vaikutusta ei vielä tiedetä (Kutilla, 2020; Marila, 2020; Nissin, 2020). Toisaalta autonomisen ajoneuvon GNSS-paikannuksen

täysi toimintakyvyn lamauttaminen vaatisi häirintälaitteen, joka vaikuttaa kaikilla hyödynnettävillä GNSS-järjestelmien taajuuksilla. Tästäkin syystä halvimmat ja helposti saatavat laitteet eivät välttämättä tuota vakavaa uhkaa. Muita häiriöistä johtuvia vaikutuksia voisi olla hetkellinen liikenteen sujuvuuden heikentyminen ja ruuhkautuminen sekä siitä johtuvat muut ilmiöt, mikäli autonomiset ajoneuvot pysähtyisivät menetettyään GNSS-pohjaisen paikannuksen (Nissin, 2020). Tietoliikennenäkökulmasta uhan muodostaa häirintälaitteet, jotka häiritsevät myös mobiilidataverkkoja, joita hyödynnetään esimerkiksi autonomisten ajoneuvojen RTK-korjauspalvelussa. RTK-palvelun puute johtaisi paikannuksen epätarkkuuteen ja vaikuttaisi mahdollisesti sitä kautta liikenneturvallisuuteen. Tätä puolta ei kuitenkaan tutkita tässä työssä, mutta on huomioitava asia.

Teoriassa autonomisen ajoneuvon kaappaaminen ja ohjaaminen haluttuun sijaintiin on myös mahdollista. Tästä toimii esimerkkinä Lähi-idässä vuonna 2011 tapahtunut signaalin väärentämistapaus, jossa kaapattiin miehittämätön lennokki. Alus kuului Yhdysvaltojen asevoimille, jonka Iranin asevoimat kaappasivat ja pakottivat sen laskeutumaan Iranin puolelle väärentämällä lennokin GPS-sijainti. GNSS-vastaanottoon tarkoitettujen järjestelmien toimintaperiaatteet ovat pääosin samankaltaisia, joten autonomisen ajoneuvon kaappaaminen ja ohjaaminen haluttuun paikkaan voisi olla myös mahdollista. Tapaus tukee signaalin väärentämisen todellista uhkaa GNSS-paikannusta hyödyntäville autonomisille ajoneuvoille. (Lehtonen ym. 2016, s. 23 - 24) Toisaalta tällaisessa tilanteessa esimerkiksi inertiajärjestelmän ja satelliittipaikannuksen tuottamien sijaintitietojen poikkeamien vaikutuksia on vaikea arvioida, eikä sitä myöskään tutkittu tässä työssä.

6.2 Vaikutukset muihin tieliikenteen sovelluksiin

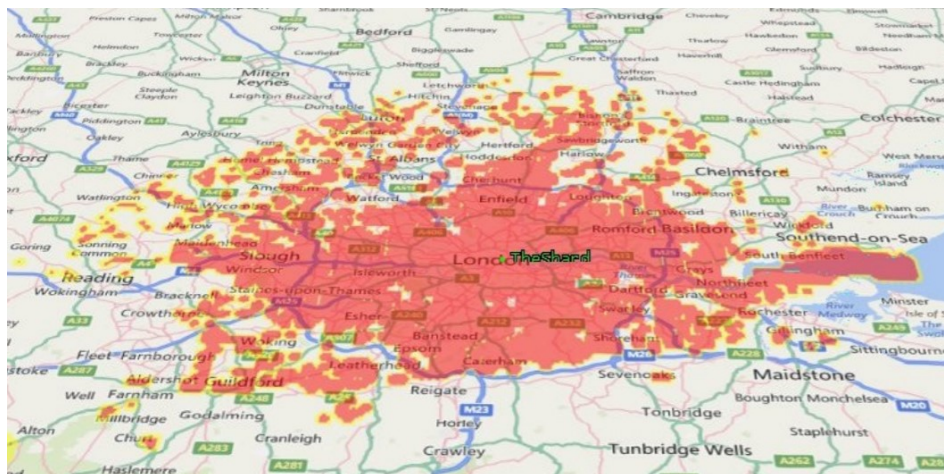
Tieliikenteessä tavalliseen navigointiin hyödynnetään älypuhelimia, erillisiä navigaattorilaitteita tai ajoneuvoon integroituja navigointiyksiköitä. Kuluttajalaitteet kuten älypuhelimet ovat erittäin alttiita GNSS-häiriösignaaleille. Satelliittipaikannusta hyödyntävä autoilija ei kykenisi navigoimaan, mikäli vieressä ajaisi esimerkiksi PPD-häirintälaitetta käyttävä kuorma-autonkuljettaja. Navigoinnin menetys häiriön tai häirinnän seurauksena ei todennäköisesti aiheuttaisi tieliikenteen turvallisuuden poikkeamia, mutta voisi vaikuttaa reittisuunnitteluun ja esimerkiksi ruuhka- tai onnettomuuspaikkojen välttämiseen navigointisovelluksen avulla. Tämä taas voisi lisätä ruuhkia ja aiheuttaa enemmän liikenteen päästöjä. Toisaalta tällaista aiheuttavan laaja-alaisen ja pitkäkestoisen häirintätilanteen todennäköisyys on erittäin pieni. Häirintälaitteen pitäisi olla kymmenien tai satojen wattien tehoinen ja se tulisi sijoittaa korkealle. Lisäksi häirintä pitäisi toteuttaa useilla GNSS-taajuuksialueilla samanaikaisesti. (Jones 2, 2017; Lehtonen ym. 2016, s. 41.)

Pelastus- ja poliisitoiminnassa hyödynnetään navigointia löytämään hälytyspaikalle. Mikäli kyseessä olisi laajamittainen GNSS-häiriö, niin kohteeseen löytäminen hankaloituisi. Seuraukset eivät todennäköisesti olisi vakavia, koska pelastustoiminnassa voidaan hyödyntää muitakin paikannuskeinoja ja mahdollisuus perille löytämisen estymisestä kokonaan häiriön seurauksena on todennäköisesti hyvin pieni. (Lehtonen ym. 2016, s. 34)

Automaattinen hätäpuhelinjärjestelmä eCall pohjautuu GNSS:n tuottamaan paikkatietoon. Mikäli häirintää tai häiriötä esiintyisi kyseisen laitteen läheisyydessä ja sen hyödyntämällä GNSS-taajuuksilla, niin paikkatieto ei välittyisi onnettomuustilanteessa hätäkeskukseen. (Lehtonen ym. 2016, s. 35) Häiriötilanteessa avun saanti ei todennäköisesti viivästyisi merkittävästi tavanomaisessa liikenneonnettomuudessa, jossa apu pystytään soittamaan paikalle sivullisten tai onnettomuuden osallisten toimesta. Häiriön vaikutukset voisivat olla vakavampia tilanteessa, jossa esimerkiksi PPD-laitetta käyttävä kuorma-autonkuljettaja törmää toiseen ajoneuvoon syrjäisellä harvaan liikennöidyllä tiellä ja kaikki onnettomuuden osalliset loukaantuisivat toimintakyvyttömiksi. Avun saanti voisi viivästyä merkittävästi, mikäli häirintälaitte ei rikkoutuisi onnettomuuden vaikutuksesta ja estäisi edelleen eCall-järjestelmää välittämästä paikkatietoa hätäkeskukseen. Vielä vaikeammaksi tilanteen tekisi häirintälaitte, joka häiritsee myös matkapuhelinverkkoja estäen eCall-järjestelmän puheyhteyden muodostamisen ajoneuvon ja hätäkeskuksen välille. Tämä voisi haitata myös hätäkeskuksen suorittamaa matkapuhelinverkkojen avulla tehtävää paikannusta. (User technology report, 2018, s. 22; ks. myös Kutila, 2020; Marila, 2020)

Muut työssä käsitellyt tieliikenteen sovellukset eivät aiheuttaisi häiriön vaikutuksessa terveyttä uhkaavia vaaratilanteita. MaaS, älypiirturit, tiemaksut, kalustonhallintajärjestelmät ja ajoneuvojen vakuutusmaksut aiheuttaisivat todennäköisesti vain pientä haittaa häiriintyessään. MaaS-palvelun osalta GNSS-pohjaiset toiminnallisuudet eivät olisi käytössä häiriön aikana ja haittaa esiintyisi käyttäjille palvelun toimivuudessa ja saatavuudessa. Älypiirtureiden ja kalustonhallintajärjestelmien toimimattomuus aiheuttaisi todennäköisesti vain kuljetusyrityksille sisäisiä ongelmia operatiiviseen toimintaan ja mahdollisesti taloudellisia menetyksiä. Huomionarvoista on, että ajopiirtureiden tietojen väärentäminen on rikos, josta seuraa sakkorangaistus (Tulli, 2015). Tahallisesti häirintälaitteella tehty älypiirturin sijainnin peittäminen on tiedon väärentämistä. GNSS-pohjaisten tiemaksu- ja vakuutusmaksupalveluiden osalta satelliittipaikannuksen häiriöt ja häirintätilanteet voisivat johtaa maksuja keräävien toimijoiden taloudellisiin menetyksiin maksujen saamatta jäämisen takia. Nykyisin ammattiautoilijat käyttävät laajalti PPD-laitteita välttääkseen tiemaksuja ja peittääkseen sijaintinsa työnantajalta. Maksujärjestelmien ja älypiirtureiden tapauksessa häiriöiden aiheuttamat poikkeamat saataisiin todennäköisesti selville tuotetun datan tarkastamisella, koska monet järjestelmät hyödyntävät myös erilaisia antureita datan keräämiseen (Kutila, 2020).

Työssä hyödynnetyn tutkimusaineiston ja kyselyn perusteella selviää, että mikään GNSS-pohjainen järjestelmä tai laite ei toimi oikein, jos sitä häiritään vastaanottimen hyödyntämällä taajuudella. Tästä syystä häiriöiden vastatoimet ja häiriötilanteisiin varautuminen tulisi ottaa huomioon erityisesti kaikkien turvallisuuskriittisten sovellusten suunnittelussa sekä muissa GNSS-paikannusta hyödyntävissä toiminnoissa ja palveluissa. Tieliikenteen osalta erityistä huomiota tulisi kiinnittää autonomisten ajoneuvojen häiriönsieto ominaisuuksiin sekä eri tyyppisten häiriötilanteiden tunnistamiseen. Tahallisen häirinnän lisäksi riskinä sovellusten tai palveluiden toiminnalle on myös tahattomat häiriöt, jotka aiheutuvat taajuuksien väärinkäytöstä ja esimerkiksi vikaantuneen sähkölaitteen lähettämän sähkömagneettisen säteilyn takia. Sillä ei ole merkitystä hyödynnetäänkö GNSS-vastaanotinta ajoneuvon ajamiseen, navigointiin, maksupalveluihin tai mihin tahansa muuhun käyttökohteeseen, koska kaikissa satelliittipohjaisissa sovelluksissa PNT-palvelua tuotetaan samojen mittausperiaatteiden pohjalta. Laajassa häiriötilanteessa kaikki yhteiskunnan tärkeät toiminnot, jotka saavat aika- tai paikkatiedon satelliittisignaalien avulla ovat alttiina palveluiden katkeamiselle tai epänormaaleille toiminnalle. Kuvassa 27 näkyy simuloitu peittoalue häirinnän vaikutusalueesta Lontoon keskustassa. Häirintälähetin on asetettu simuloinnissa 310 metrin korkeuteen Lontoon korkeimman rakennuksen The Shard pilvenpiirtäjän huipulle. Lähettimen tehoksi on asetettu 100W. Laajimmillaan häiriön vaikutusalueen halkaisija on jopa 100 kilometriä. (Jones 2, 2017) Vastaavan laajuinen todellinen häirintä aiheuttaisi luonnollisesti erittäin suuria haittoja laajamittaisesti kaikille GNSS-vastaanottoa hyödyntäville sovelluksille ja toiminnoille.



Kuva 27. Simuloitu häirintälähettimen vaikutusalue Lontoossa. Häirintälaite on 310 metrin korkeudessa. (Jones 2, 2017)

7 YHTEENVETO JA POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää tärkeimpiä satelliittipaikannusta hyödyntäviä tieliikenteen sovelluksia ja niiden toimintaa sekä niihin kohdistuvia vaikutuksia paikannuksen häiriötilanteissa. Työssä tarkasteltiin myös satelliittipaikannuksen ja sen häiriöiden perusteita. Satelliittipaikannusta hyödynnetään lukuisissa yhteiskunnan sovelluksissa, joten työ rajattiin käsittelemään vain tieliikenteen sovelluksia. Opinnäytetyön häiriöitä käsittelevissä kappaleissa ei otettu huomioon kyberuhkia, jotka ovat myös merkittäviä riskitekijöitä GNSS-pohjaisille sovelluksille.

Työssä käsiteltiin kaikkiaan kahdeksaa tieliikenteen satelliittipaikannusta hyödyntävää sovellusta. Parhaimmillaan nämä GNSS-pohjaiset palvelut auttavat taistelussa ilmastonmuutosta vastaan ja eCall-järjestelmä voi pelastaa jopa ihmishenkiä. Lisäksi sovellukset voivat parantaa liikenneturvallisuutta esimerkiksi ajotapojen muuttuessa tai onnettomuus- ja ruuhkatilanteiden tiedottamisen sekä reittisuunnittelun johdosta. Häiriötilanteiden aiheuttamien seurauksien näkökulmasta merkittävin sovellus on autonomiset ajoneuvot. On kuitenkin todennäköistä, että sensorifuusio estäisi mahdolliset häirinnästä tai signaalin väärentämisestä aiheutuvat vaikutukset. Muut sovellukset eivät todennäköisesti aiheuttaisi vakavia vaaratilanteita häiriintyessään. Niiden haitat olisivat mahdollisesti vain taloudellisia tai liikenteen sujuvuuteen liittyviä ongelmia. Toisaalta eCall-järjestelmän häiriintyessä pahimmassa mahdollisessa skenaariossa, voisi siitä aiheutua jopa erittäin vakavia seurauksia onnettomuustilanteissa. Todennäköisyys siihen on kuitenkin hyvin pieni.

Satelliittipaikannuksen markkinat kehittyvät kovaa vauhtia ja GNSS-pohjaisia sovelluksia kehitetään kasvavissa määrin. Tämän rinnalla tekniikan kehittyessä ja komponenttien kustannusten laskiessa yleistyy myös häirintälaitteet. GNSS-pohjaisten tiemaksujen ja muiden sitä hyödyntävien sovellusten yleistyessä joillain ihmisillä syntyy myös tarve välttää näitä maksuja käyttämällä häirintälähetimiä. Lisäksi häirintälaitteita saatetaan käyttää rikollisessa toiminnassa, kokeilumielessä tai tahallisesti sekasorron aiheuttamiseen. Häirinnän estämiseksi ja havaitsemiseksi on kuitenkin kehitetty tekniikoita ja niitä kehitetään edelleen. Vastaanottimet ja antennit kehittyvät jatkuvasti ja tätä kehitystä tulisi myös hyödyntää tieliikenteen turvallisuuskriittisissä sovelluksissa kuten autonomisten ajoneuvojen sensorisuunnittelussa. Vastatoimien kehittämiseen on herätty maailmalla ja esimerkiksi STRIKE3-hanke tähtäsi nimenomaan GNSS-häiriöiden tunnistamiseen ja toimenpiteiden standardoimiseen. Lisäksi ainakin Euroopan GNSS-virasto esittää vuoden 2019 liikennesegmentin käyttäjien tarpeita listaavassa raportissaan vaatimuksia autonomisten ajoneuvojen häiriöiden tunnistus-ominaisuuksista.

Työtä tehdessä ja aineistoa sekä asiantuntijakyselyn tuloksia tutkiessa syntyi hyvä käsitys tämän hetkisestä tilanteesta satelliittipaikannuksen häiriöihin varautumisessa etenkin autonomisten ajoneuvojen osalta. Aineistoa häirinnän konkreettisista vaikutuksista tuntui olevan vähän saatavilla ja kyselyn perusteella jäi se käsitys, että asiasta tiedetään ylipäättään hyvin vähän tai siihen ei oteta kantaa, koska todellista tarvetta ei välttämättä nähdä. Autonomisten ajoneuvojen kehitys on vielä vaiheessa ja näkemyksiä sensoriratkaisujen osalta on paljon. Jotkut puhuvat GNSS-paikannuksen puolesta ja jotkut näkevät kameran tuottaman visuaalisen datan merkittävämpänä. Yhteinen näkemys kaikessa tutkimusaineistossa on kuitenkin se, että sensorifuusio ja laadukkaat sekä tarkat kartta-aineistot ovat ehdottomia edellytyksiä toimivalle autonomisen ajoneuvon paikannusratkaisulle. Satelliittipaikannus on erittäin herkkä ulkoisille häiriötekijöille, joten on selvää, että GNSS ei riitä yksinään turvalliseen ja toimintavarmaan paikannukseen. Mikäli satelliittipaikannus on pääasiallisena tai merkittävänä paikannusmenetelmänä missä tahansa järjestelmässä, tulisi siinä hyödyntää aina monitaajuusvastaanotinta useamman GNSS-järjestelmän tuella. Sensorifuusiassa kaikki järjestelmät tukevat toistensa tuottamaa dataa ja tekee paikannuksesta luotettavampaa. Häirinnän todellisten vaikutusten tutkimiseen tulisi suorittaa konkreettisia testejä oikeilla häirintälaitteilla. Teoreettisesti tulkittuna mikään GNSS-pohjainen sovellus ei toimi oikein häirinnän alla, mikäli paikannus perustuu vain satelliittien tuottamaan ratkaisuun. Erityisesti autonomisten ajoneuvojen toiminnan selvittäminen häirinnän vaikutuksessa testeillä olisi mielenkiintoista ja tarpeellista.

Maailmalla on paljon esimerkkejä tahallisen häirinnän ja signaalin väärentämisen aiheuttamista vikatilanteista monissa eri palveluissa ja sovelluksissa. Suomessakin oli vuonna 2018 epäilty häirintätapaus, joka vaikutti ainakin lentoliikenteen toimintaan ja sen uskottiin haittaavan käynnissä olutta autonomisten ajoneuvojen testausta. Toistaiseksi Suomessa on ollut hyvin vähän GNSS-häirintää ja tahattomasti aiheutuvia häiriötilanteitakin esiintyy vähän. Liikenne- ja viestintävirasto valvoo Suomessa taajuuksien käyttöä ja pyrkii poistamaan kaikki havaitut merkittävimmät häiriöt. Häirintä ja signaalin väärentäminen ovat kuitenkin todellisia uhkia, sillä nykypäivänä suuritehoisten lähettimien hankinta on erittäin helppoa eivätkä kustannukset ole suuria. Lisäksi esimerkiksi Venäjän asevoimilla on todennäköisesti kalustoa, jolla laajamittaista GNSS-häirintää voidaan suorittaa (C4ADS, 2019). Lopulta kyse on vain siitä, että käyttääkö kukaan näitä laitteita ja jos käyttää, niin kuinka suunnitelmallista ja laajaa se tulisi olemaan. Tästä johtuen kaikissa yhteiskunnan sovellusten ja toimintojen suunnittelussa tulisi ottaa huomioon GNSS-häirinnän vaikutukset ja varautua tilanteeseen, jossa PNT-palvelua ei saada. Yksinkertaisimmillaan varautuminen onnistuu suunnittelemalla sovelluksiin vaihtoehtoisia paikannus- tai aikaratkaisuja.

LÄHTEET

Alexandrow, C. (2016). The story of GPS. *DARPA: 50 Years of Bridging the Gap*, 18.10.2016, s. 54. Haettu 10.9.2019 osoitteesta <https://is-suu.com/faircountmedia/docs/darpa50>

Automotive. (2019). Volvo Readies Self-Driving XC90 for Production. Automotive Fleet Magazine, Bobit Business Media. Haettu 26.1.2020 osoitteesta <https://www.automotive-fleet.com/334354/volvo-has-a-production-ready-self-driving-car>

BeiDou. (2018). Systems. Official document. BeiDou Navigation Satellite System. Haettu 13.11.2019 osoitteesta <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/>

BMW. (2019). The path to autonomous driving. BMW AG. Haettu 26.1.2020 osoitteesta <https://www.bmw.com/en/automotive-life/autonomous-driving.html>

C4ADS. (2019). ABOVE US ONLY STARS EXPOSING GPS SPOOFING IN RUSSIA AND SYRIA. C4ADS. Haettu 9.3.2020 osoitteesta <https://www.c4reports.org/aboveusonlystars>

Dumville, M. (2018). Initial Findings from the STRIKE3 GNSS Interference Monitoring Network. Nottingham Scientific Ltd. Haettu 4.3.2020 osoitteesta <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2018-05/dumville.pdf>

ESA. (2011). GPS General Introduction. European Space Agency. Haettu 18.9.2019 osoitteesta https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_General_Introduction

ESA 2. (2011). GLONASS. European Space Agency. Haettu 25.10.2019 osoitteesta <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Category:GLONASS>

ESA 3. (2011). NAVIC. European Space Agency. Haettu 13.11.2019 osoitteesta <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NAVIC>

ESA 4. (2011). SBAS Fundamentals. European Space Agency. Haettu 2.12.2019 osoitteesta https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Fundamentals

ESA 5. (2011). Road Navigation. European Space Agency. Haettu 18.12.2019 osoitteesta https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Road_Navigation

ESA 6. (2011). Tolling. European Space Agency. Haettu 17.1.2020 osoitteesta <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Tolling>

ESA 7. (2011). Fleet Management and Vehicle Tracking. European Space Agency. Haettu 21.1.2020 osoitteesta https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Fleet_Management_and_Vehicle_Tracking

EU-direktiivi 2019/520. (2019). Haettu 21.1.2020 osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019L0520&from=EN#d1e1504-45-1>

Galileo GNSS. (2018). How satellite navigation is empowering mobility solutions. Galileo GNSS. Haettu 11.2.2020 osoitteesta <https://galileo-gnss.eu/how-satellite-navigation-is-empowering-mobility-solutions/>

GIM. (2019). China Announces Worldwide Coverage by BeiDou. *GIM International* 16.1.2019. Haettu 18.9.2019 osoitteesta <https://www.gim-international.com/content/news/china-announces-worldwide-coverage-by-beidou>

GNSS Market Report. (2019). GSA GNSS Market Report, Issue 6. European GNSS Agency. Haettu 17.12.2019 osoitteesta <https://www.gsa.europa.eu/market/market-report>

GPS.gov. (n.d.). What is GPS? GPS.gov, Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. Haettu 10.9.2019 osoitteesta <https://www.gps.gov/systems/gps/>

GSA. (2017). What is GNSS? European GNSS Agency. Haettu 18.9.2019 osoitteesta <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss>

GSA 2. (2018). Galileo. What is Galileo? Programme. European GNSS Agency. Haettu 7.11.2019 osoitteesta <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/galileo-european-global-satellite-based-navigation-system>

GSA 3. (2019). What is SBAS? European GNSS Agency. Haettu 26.11.2019 osoitteesta <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/what-sbas>

GSA 4. (2019). Do eCall devices conform? European GNSS Agency. Haettu 12.12.2019 osoitteesta <https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/do-ecall-devices-conform>

GSA 5. (2019). Report on Road User Needs and Requirements. European GNSS Agency. Haettu 18.12.2019 osoitteesta https://www.gsa.europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Report_on_User_Needs_and_Requirements_Road.pdf

GSA 6. (2018). Road pricing and pay-per-use insurance. European GNSS Agency. Haettu 25.1.2020 osoitteesta <https://www.gsa.europa.eu/library/case-studies/road-pricing-and-pay-use-insurance>

GSA 7. (2019). Galileo supporting Mobility as a Service. European GNSS Agency. Haettu 11.2.2020 osoitteesta <https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/galileo-supporting-mobility-service>

GSA 8. (2019). Satellite positioning is changing how we move. European GNSS Agency. Haettu 11.2.2020 osoitteesta <https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/satellite-positioning-changing-how-we-move>

GSA 9. (n.d.). STRIKE3 Project. European GNSS Agency. Haettu 4.3.2020 osoitteesta <http://www.gnss-strike3.eu/>

GSA 10. (2018). Applications. European GNSS Agency. Haettu 5.3.2020 osoitteesta <https://www.gsa.europa.eu/galileo/applications>

Günter, H. (2019). Working Papers: Speed Verification in the Smart Tachograph. *Inside GNSS*, 13.2.2019. Haettu 16.1.2020 osoitteesta <https://insidegnss.com/working-papers-speed-verification-in-the-smart-tachograph/>

IAC 1. (n.d.). BeiDou global navigation satellite system. Information and analysis center for positioning, navigation and timing. Haettu 23.9.2019 osoitteesta <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/beidou.php>

IAC 2. (n.d.). GLONASS history. Information and analysis center for positioning, navigation and timing. Haettu 27.9.2019 osoitteesta <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/index.php>

IMS. (n.d.). Road Usage Charge: The better alternative to large scale road charging. Intelligent Mechatronic Systems Inc. Haettu 17.1.2020 osoitteesta <https://www.intellimec.com/ims-road-charging-intelligence>

Inside GNSS 1. (2012). GNSS Jamming in the Name of Privacy. *Inside GNSS*, 15.3.2012. Haettu 17.11.2019 osoitteesta <https://insidegnss.com/gnss-jamming-in-the-name-of-privacy/>

Inside GNSS 2. (2015). eCall. *Inside GNSS*, 19.11.2015. Haettu 12.12.2019 osoitteesta <https://insidegnss.com/ecall/>

Inside GNSS 3. (2018). On the Road to Autonomy Webinar. Inside GNSS Media & Research LLC. Haettu 30.1.2020 osoitteesta <https://insidegnss.com/download/on-the-road-to-autonomy-webinar-pdf/?wpdmdl=179544&refresh=5e320a6e3699f1580337774>

Jammer. (2017). HPJ1000 Powerful 60W desktop jammer. Jammer-Store. Haettu 27.11.2019 osoitteesta <https://www.jammer-store.com/hpj1000-high-power-gsm-jammer.html>

Jones, M. 1. (2017). Anti-jam systems: Which one works for you? *GPS WORLD* 4.6.2017. Haettu 30.12.2019 osoitteesta <https://www.gpsworld.com/anti-jam-systems-which-one-works-for-you/>

Jones, M. 2. (2017). GNSS Protection Overview 2017. Roke Manor Research. Haettu 14.2.2020 osoitteesta <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2017-11/jones.pdf>

Kumar, C. (2018). Satellites are in the sky, but long way to go before average Indians get Desi GPS. *The Times Of India* 6.8.2018. Haettu 14.11.2019 osoitteesta <https://timesofindia.indiatimes.com/india/satellites-are-in-the-sky-but-long-way-to-go-before-average-indians-get-desi-gps/articleshow/64506628.cms>

Kuusniemi, H. (2012). Interference / Jamming: Signal barred. *Geospatial World*. Haettu 16.11.2019 osoitteesta <https://www.geospatial-world.net/article/interference-jamming-signal-barred/>

Lehtonen, S., Virtanen, A. & Askola, H. (2016). Liikenteen sähköisten palveluiden tietoturva – niihin kohdistuvat tietoturvariskit ja häirintämennettelmät sekä näiden vaikutukset ja ennaltaehkäisy. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Haettu 17.2.2020 osoitteesta <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T253.pdf>

Lu, M. (2018). Overview of the BDS III Signals. Tsinghua University 8.11.2018. Haettu 13.11.2019 osoitteesta http://web.stanford.edu/group/scpnt/pnt/PNT18/presentation_files/I05-Lu-Overview_BDS-III_Signals.pdf

MML. (n.d.). Autonominen ajaminen. Maanmittauslaitos. Haettu 26.1.2020 osoitteesta <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/autonominen-ajaminen>

NovAtel. (2015). GNSS Book. An Introduction to GNSS: GPS, GLONASS, Galileo, and Other Global Navigation Satellite Systems. NovAtel Inc. Haettu 20.9.2019 osoitteesta <https://www.novatel.com/support/knowledge-and-learning/published-papers-and-documents/gnss-book>

NovAtel 2. (2015). Unintentional Interference. NovAtel Inc. Haettu 17.11.2019 osoitteesta <https://www.novatel.com/tech-talk/velocity/velocity-2015/unintentional-interference/>

NRL. (n.d.). Navigational Technology Satellites (NTS). U.S. Naval Research Laboratory. Haettu 10.9.2019 osoitteesta <https://www.nrl.navy.mil/ssdd/heritage/nts>

NXP. (n.d.). V2X Communications. NXP Semiconductors. Haettu 28.1.2020 osoitteesta <https://www.nxp.com/applications/solutions/automotive/connectivity/v2x-communications:V2X-COMMUNICATIONS>

Oponeo. (2019). What Europeans Actually Think of Autonomous Cars. Oponeo.co.uk Ltd. Haettu 26.1.2020 osoitteesta <https://www.oponeo.co.uk/blog/what-europeans-actually-think-of-autonomous-cars>

Orolia. (2019). Intelligent Transportation Systems Overview. Resilient Positioning, Navigation and Timing (PNT) Solutions for the World's Mobile Infrastructure. Orolia. Haettu 30.12.2019 osoitteesta <https://www.orolia.com/sites/default/files/document-files/ITS%20Overview%20Brochure.pdf>

PennState. (n.d.). GEOG 862: GPS and GNSS for Geospatial Professionals. Lesson 3: The Framework. The Control Segment. PennState, College of Earth and Mineral Sciences. John A. Dutton e-Education Institute. Haettu 25.9.2019 osoitteesta <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1776>

Poutanen M. (2016). *Satelliittipaikannus*. Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa ry.

Punjwani, M. (2019). Pay-as-you-go car insurance. MoneySuperMarket. Haettu 25.1.2020 osoitteesta <https://www.moneysupermarket.com/car-insurance/pay-as-you-go/>

QZSS. (n.d.). Service Overview. Quasi-Zenith Satellite System. Cabinet Office, Government Of Japan. Haettu 26.11.2019 osoitteesta <https://qzss.go.jp/en/overview/services/index.html>

QZSS 2. (2018). QZSS Update. Cabinet Office, Government of Japan. Masaharu Kugi. Haettu 26.11.2019 osoitteesta <https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/icg13/06.pdf>

Radio Mobile. (2019). Radio Mobile. Roger Coudé VE2DBE. Haettu 27.11.2019 osoitteesta https://www.ve2dbe.com/rmonline_s.asp

Road User Report. (2019). Report on Road User Needs and Requirements, Issue 2. European GNSS Agency. Haettu 28.1.2020 osoitteesta [https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Report on User Needs and Requirements Road.pdf](https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Report%20on%20User%20Needs%20and%20Requirements%20Road.pdf)

Scania. (2019). UUDEN SUKUPOLVEN AJOPIIIRTURI. Scania Suomi Oy. Haettu 16.1.2020 osoitteesta <https://www.scania.com/fi/fi/home/experience-scania/features/2019/alykas-ajopiirturi.html>

Septentrio. (n.d.). The Chirp Jammer: a GPS hit and run. Septentrio N.V. Haettu 17.11.2019 osoitteesta <https://www.septentrio.com/en/insights/chirp-jammer-gps-hit-and-run>

Septentrio 2. (n.d.). What is spoofing and how to ensure GPS security? Septentrio N.V. Haettu 30.12.2019 osoitteesta <https://www.septentrio.com/en/insights/what-spoofing-and-how-ensure-gps-security>

Spark. (2018). A Journey in the Hyperloop – a look into the travel experience of the future. Desing Spark. Haettu 11.2.2020 osoitteesta <https://www.rs-online.com/designspark/what-does-the-hyperloop-experience-look-like-a-short-journey-into-the-future-of-travel>

Traficom. (2019). Digitaalinen ajopiirturikortti. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Haettu 16.1.2020 osoitteesta <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/tieliikenne/digitaalinen-ajopiirturikortti>

Traficom 2. (2019). Radiohäiriöiden ehkäisy ja selvittäminen. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Haettu 11.2.2020 osoitteesta <https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/radiohairioiden-ehkaisy-ja-selvittaminen>

Tselentis, D., Yannis, G., Vlahogianni, E. (2016). Innovative insurance schemes: pay as/how you drive. Haettu 25.1.2020 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/304530360_Innovative_Insurance_Schemes_Pay_ashow_You_Drive

Tulli. (2015). Kuljettajat yrittävät huijata viranomaisia väärentämällä ajopiirturin merkintöjä. Suomen Tulli. Haettu 11.3.2020 osoitteesta https://tulli.fi/artikkeli/-/asset_publisher/kuljettajat-yrittavat-huijata-viranomaisia-vaarentamalla-ajopiirturin-merkintoja

Ucar, Z., Bettinger, P., Weaver, S., Merry, K. & Faw, K. (2014). Dynamic accuracy of recreation-grade GPS receivers in oak-hickory forests. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, Volume 87, Issue 4, 10/2014, s. 504–511. Haettu 30.3.2020 osoitteesta <https://academic.oup.com/forestry/article/87/4/504/2756075>

User technology report. (2018). GNSS USER TECHNOLOGY REPORT, ISSUE 2. European GNSS Agency. Haettu 11.2.2020 osoitteesta https://www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss_user_tech_report_2018.pdf

Vardhan, H. (2017). HD Maps: New age maps powering autonomous vehicles. *Geospatial World* 22.9.2017. Haettu 20.3.2020 osoitteesta <https://www.geospatialworld.net/article/hd-maps-autonomous-vehicles/>

Zahidul, M., Thombre, S., Söderholm, S., Kirkko-Jaakkola, M., Ruotsalainen, L. & Kuusniemi, H. (2015). A SOFTWARE MULTI-GNSS RECEIVER IMPLEMENTATION FOR THE INDIAN REGIONAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM. Finnish Geospatial Research Institute FGI, National Land Survey NLS. Haettu 13.11.2019 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/283010942_A_Software_Multi-GNSS_Receiver_Implementation_for_the_Indian_Regional_Navigation_Satellite_System

Asiantuntijahaastattelut

Kuttila, M., Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 12.2.2020, sähköpostihaastattelu

Maanpää, J., Maanmittauslaitos, 20.2.2020, sähköpostihaastattelu

Marila, S., Maanmittauslaitos, 7.2.2020, sähköpostihaastattelu

Nissin, O., Metropolia, 3.3.2020, sähköpostihaastattelu

Virtanen, A., Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, 12.2.2020, sähköpostihaastattelu

Asiantuntijakysely - kysymykset

Autonomisten ajoneuvojen GNSS-paikannus ja siihen kohdistuvien häiriöiden vaikutukset

1. Mitkä paikannusratkaisut ja sensorit ovat välttämättömiä, jotta autonominen ajaminen on ylipäättään mahdollista? (Onko GNSS-vastaanotto ehdoton edellytys?)
2. Mitä vaatimuksia GNSS-vastaanottimelle on? Riittääkö yksitaajuusvastaanotin vai onko oltava monitaajuusvastaanotin useamman GNSS-järjestelmän tuella?
3. Onko GNSS-antennille erityisvaatimuksia tyyppin tai häiriönsieto-ominaisuuksien puolesta?
4. Mikä satelliittipaikannustekniikka on tällä hetkellä paras vaihtoehto autonomisen ajoneuvon GNSS-paikannukseen ja mikä on minimi tarkkuusvaatimus? RTK, PPP vai jokin muu?
5. Miten autonominen ajoneuvo käyttäytyy menettäessään satelliittien tuottaman paikannusratkaisun ulkoisen häiriön johdosta? Kuinka kauan ajoneuvo kykenee normaaliin toimintaan muiden sensoreiden avulla ilman GNSS-paikannusta?
6. Mitä häiriöiden vastatoimia ja tunnistuskeinoja autonomisissa ajoneuvoissa hyödynnetään?
7. Kuinka haitallisina pidätte PPD-jammereita (Personal Privacy Device) tai muita helposti saatavilla olevia häirintälaitteita tulevaisuuden älyliikenteelle?
8. Kuvaile älyliikenteeseen kohdistuvien GNSS-häiriöiden vaikutuksia liikenneturvallisuuden näkökulmasta.
9. Käsittelen opinnäytetyössäni muitakin GNSS-pohjaisia liikenteeseen liittyviä sovelluksia kuten eCall, älypiirturi, perinteinen navigointi ja satelliittipaikannusperusteiset tie-maksut. Millä tavalla laajamittainen ja pitkäkestoinen GNSS-häiriö vaikuttaisi näiden palveluiden käytettävyyteen, saatavuuteen ja luotettavuuteen?
10. Jos mieleesi tulee muuta tärkeää tietoa aiheeseen liittyen, niin pyydän lisäämään sen tähän. Otan myös mielelläni vastaan muuta materiaalia, jota voisin käyttää lähteenä. Kiitos vastauksistasi!